

傾斜ロータによるクアドロータ機の横風下での機首上げモーメントの低減

○大塚光、河野将佳、薬師川楓、永谷圭司（東北大学）

Pitching moment reduction of a quadrotor UAV in wind gusts by canted rotors
Hikaru Otsuka, Masayoshi Kohno, Kaede Yakushigawa, and Keiji Nagatani (Tohoku University)

Key Words: Multirotor UAV, Wind tunnel, Pitching moment, Wind gust

Abstract

Multirotor unmanned aerial vehicles are applied to various applications such as observation, building damage inspection, and transportation of medical kits because they can hover, and take off and land vertically. Although their abilities are useful for civilian applications, their posture stability is weak in gusts due to the generation of pitching moments. Therefore, improved stability and gust tolerance are required in outdoor flight operations. We proposed canted rotors for quadrotor UAVs to reduce pitching moment prelibation in gusts, and to improve posture stability of the UAV. First, we measured isolated rotor performance in a wind tunnel. Second, we estimated pitching moment of quadrotor UAV. Third, we measured pitching moment of a quadrotor model in a wind tunnel experiment and compared it to the estimated performance. Experimental results clarified that outer slanted rotor configuration reduced pitching moment of the quadrotor UAV in gusts by 26%.

1. はじめに

無人航空機の一つである小型マルチロータ機は、複数のロータを備えた垂直離着陸機(VTOL)であり、滞空することが可能である。これまでも固定翼タイプの UAV は開発されてきたが、マルチロータ機は滞空飛行が可能であり、従来の UAV よりも安価なことで、UAV の利用方法に多様性を与えている。近年では、マルチロータ機を用いた遠隔地への物資輸送、橋やトンネルなどの建築物の点検、地形測量などに利用が試みられている。

マルチロータ機は、産業利用が期待される一方で、横風時の姿勢安定性が低く、強風下ではロータ推力低下により飛行が維持できなくなることが知られている。屋外環境での応用範囲の拡大する為には、強風下で飛行を維持し、横風外乱に耐性を持たせることが求められている。

横風中でのピッチングモーメントについて、Theyらは、マルチロータ機の飛行モデルを作成するために、横風中のロータにかかる空気力を計測した[1]。彼らは風洞実験により、迎角 60° において、風速が速くなるとロータのピッチングモーメントが増加することを示していた。また、Kuhnらは、チルトロータ機の開発過程で、迎角 0° から 90° までのロータピッチングモーメントを測定し、横風中でロータにピッチングモーメントが発生することを示した[2]。

本研究では、ロータの取り付け角度を傾斜させることで、横風下で発生する機首上げピッチングモーメントを減少させることを提案し、検証実験を行っ

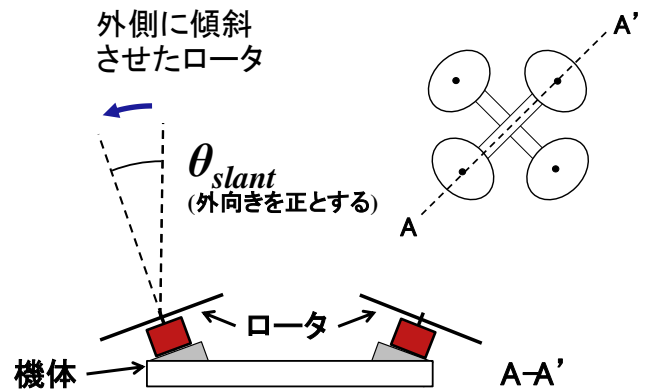


図1 横風下でのピッチングモーメント低減のための外側傾斜ロータの概念図

た(図1)。機体に働くピッチングモーメントを減らすことで、モーメントを相殺するために必要なロータ間の回転数差を小さくすることができる為、より速い横風の中でも飛行できると考えられる。さらに、ピッチングモーメントが小さくなることで、突発的な横風に対しての姿勢変化量が小さくなり、機体姿勢が安定すると考えられる。本研究の目的は、ロータの傾斜角度が横風飛行中の機体に働くピッチングモーメントへ及ぼす影響を明らかにすることである。

以降では、提案する傾斜ロータによる機首上げモーメントの低減について原理を述べる。さらに、モーメントの低減効果を推定するために行った単独ロータについての風洞試験結果、およびクアドロータ機模型を用いた風洞試験結果について報告する。

2. 横風下におけるピッチングモーメントの発生

2. 1 マルチロータ機の飛行

ピッチングモーメントの低減手法に言及する前に、マルチロータ機の飛行力学について述べる。一般的なマルチロータ機は、ロール、ピッチング、ヨー運動を同一平面に平行に配されたロータの回転数制御によって実現している。ラダーやエルロンのような可動翼ではなく、ロータの回転数の調整のみによって3つの運動を行うことで、マルチロータ機は簡便なシステムと、低コストを実現している。図2に、クアッドロータ機におけるホバリング、水平飛行、ヨー回転の際のロータの状態を示す。ホバリングでは、すべてのロータの回転数は同じである。一方、ヨー回転の際には、回転方向が互い違いに配置されているロータのうち、片方の回転方向のロータを加速し、もう一方のロータを減速する。このようにして、全体での推力を維持しながら、機体はロータに発生する反モーメントを利用してヨー回転を行う。水平飛行の際には、マルチロータ機は、推力を増加させ機体を進行方向に傾ける。機体を傾けることによって、ロータ推力から揚力と推進力を生み出し、機体は水平飛行を行う。このとき、機体には機首を上げようとする力が働く。水平飛行中は、このモーメントを打ち消すため、後方側ロータを前方側ロータよりも早く回転させて、ピッチング方向の釣り合いを保っている。

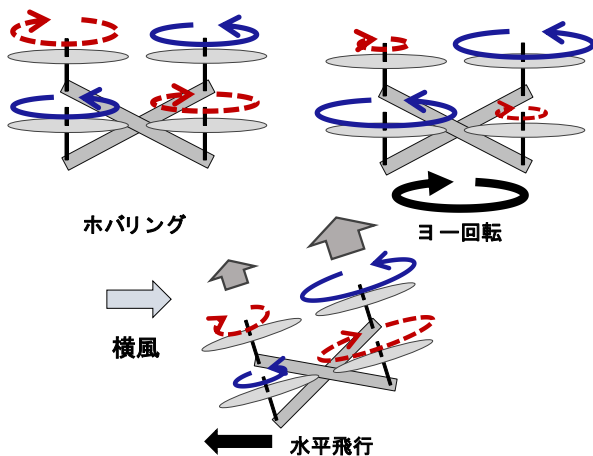


図2 マルチロータ機の飛行状態とロータ回転数

2. 2 横風が機体に及ぼす影響

冒頭でも述べたように、マルチロータ機は突風や横風の中では、ロータの推力変化や機体の姿勢変化が起こり、飛行状態が不安定となる。横風中で発生するロータの推力の低下の原因は、横風がロータ面に流入することで、ロータブレードの有効迎角が減

少することによるものである。固定翼機の翼短渦による効果と同様に、ロータ面に垂直な流れが入り込むことでロータ推力は減少する。ロータの回転速度に対する流れの速度は進行率として定義され、進行率が大きくなるにつれて推力は低下する[3]。このように、横風飛行中はロータの推力がホバリング状態よりも減少するため、ロータを速く回転させることで推力の不足を補っている。加えて、横風の速度が速くなるにつれてピッチングモーメントも増加する。よって、強風下ではピッチングモーメントの釣り合いを取るために、より多くの前方側と後方側のロータ回転数差を生み出す必要がある。Russelらは風洞を用いて、市販されているマルチロータ機に働く空気力計測を行い、横風中でのピッチングモーメントの釣り合いのために必要な回転数差について例を示している[4]。

以上のように、横風中の水平飛行、もしくは強風下のホバリング状態が、マルチロータ機の飛行状態の中で最もロータの回転数が求められ、ロータごとの推力余裕が最も少ない状態となる。

2. 3 傾斜ロータによるピッチングモーメント低減の提案

本研究では、横風中で発生するピッチングモーメントを低減することで、ロータの推力余裕を生み出し、突風時での機体姿勢の変化を緩和することを検討する。具体的には、ピッチングモーメントを低減する手法として、ロータを外側に傾斜させることを提案する。

一般的なマルチロータ機のロータは、同一平面内に平行に配置されている。そのため、横風に対しての各ロータでの推力とピッチングモーメントは、ほぼ同じである。一方、ロータに傾斜を加えた場合、ロータの迎角が変化するために、前方側ロータと後方側ロータの間では推力とピッチングモーメントに差が生まれる。これまでの実験により、迎角の増加によって、ロータ推力とピッチングモーメントが大きくなることを確認しており、この性質を利用して機首上げピッチングモーメントを減少させる。

図3に、平行なロータと外側に傾斜させたロータを配置した場合の、前後ロータの推力をピッチングモーメントの力関係を示す。図3において、各ロータの回転数は全て同じである。ロータを外側に傾斜させた場合、前方側のロータの推力とピッチングモーメントは減少し、後方側では増加する。このとき、全体での推力変化は、前後のロータで相殺されてしまうためにほとんど変化しない。また、ピッチング

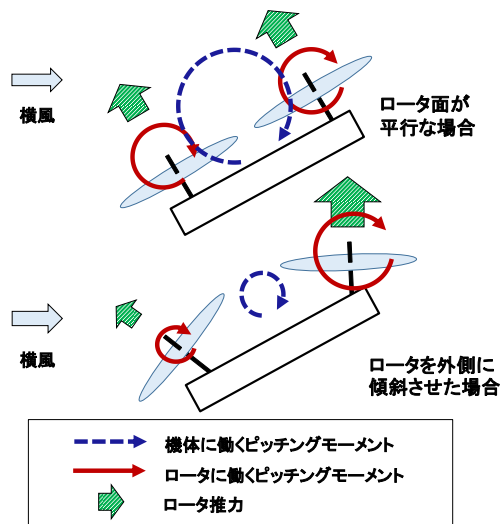


図3 外側傾斜ロータによるピッチングモーメント低減の原理

モーメントについては、ロータごとに生じるピッチングモーメントの増減は全体では相殺されるが、前後ロータでの推力差によって、機首下げのピッチングモーメントが発生すると考えられる。よって、ロータを外側に傾斜させることで、機体周りのピッチングモーメントは減少すると考えられる。反対にロータを内側に傾斜させると、ピッチングモーメントは増加すると考えられる。

ロータを傾斜させることは、ピッチングモーメントを減少させる一方で、ヨー回転時の反モーメントを減少させると共に、同一回転数比較で機体推力が小さくなると考えられる。本手法の適用には、こうした短所についても検証する必要がある。

以上の内容を踏まえ、本研究ではロータの外側傾斜によるピッチングモーメントの低減を提案する。以降では、この手法に基づいて、ロータ傾斜角が推力とピッチングモーメントに与える影響を検証する。

3. 横風下における単独ロータ計測

ロータを傾斜させた際に、マルチロータ機に働くピッチングモーメントの変化量を推定するため、横風中の単独ロータに作用する力を計測した。

3. 1 実験方法

実験には、東北大学片平キャンパス低乱熱伝達風洞を使用した。風洞は回流式であり、風上側のノズル形状は対辺との間隔が 810mm の正八角形断面である。テストセクションは、自由壁型である。

実験用ロータには、入手の容易さから実際にクアッドロータ機(DJI, Phantom2)に用いられているものを使用した。図4に実験に用いたロータ(DJI, Z-

Blade)を示す。ロータ径は 239mm で、ブレードピッチにはねじり下げが加えられている。

図5にロータ周辺の概念図と迎角の定義方向を、図6に風洞内に取り付けた実験装置を、それぞれ示す。ロータは、ブラシレスモータに取り付けられ、スピードコントローラ(Electric Speed Controller, ESC)によるクローズドループ制御によって回転数を制御している。ESCには、AutoQuadプロジェクト製ESC32ver2を用いた。ロータ直下には、6軸力覚センサ(レプトリノ, CFS034CA101U)を取り付け、ロータにかかる力を計測した。625Hzで計測を8秒間行い、測定平均を計測結果とした。重力の影響を避けるため、ロータの推力方向を水平方向とし、水平面内で装置の迎角を変化させた。

表1に実験条件を示す。風速と回転数の影響を確認するため、風速を 8, 12[m/s]、ロータの回転数を、6000, 7000[rpm]として実験を行った。ロータ迎角は、45°から 120°の間で変化させ、15°ごとに計測を行った。ただし、70°から 110°では5°ごとに計測を行った。各条件における計測回数は1回である。

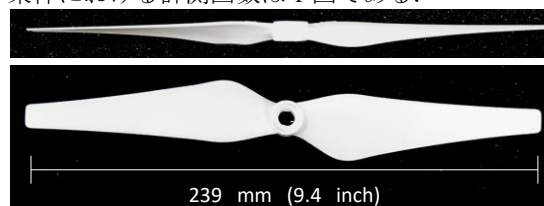


図4 計測に用いたロータ(直径 239mm, DJI, Z-blade)

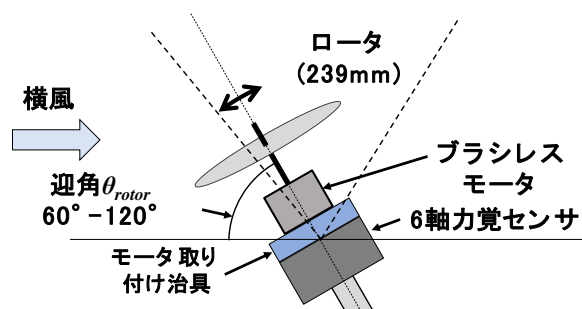


図5 ロータ周囲の概略とロータ迎角の定義

表1 単独ロータ計測時の実験条件

ロータ迎角	°	45, 60, 70 - 120 (70° - 120°では5°おきに計測)
ロータ回転数	rpm	5000, 6000, 7000
風速	m/s	8, 12
各条件において計測回数は1回とした。		

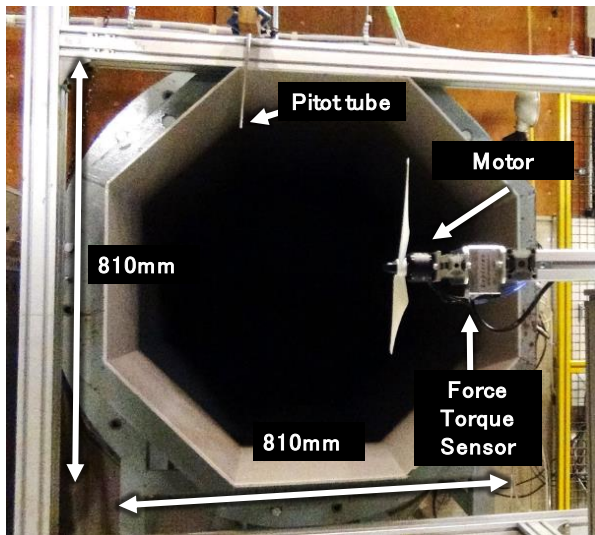


図6 単独ロータ計測時の実験装置配置

3. 2 実験結果

図7と図8に、単独ロータの迎角に対する推力とピッチングモーメントをそれぞれ示す。

図7より、すべての条件において、迎角が大きくなるにつれて推力が増加することが分かる。風速8m/s、ロータ回転数6000rpmに着目し、迎角90°の推力と比較した場合、迎角60°では34%推力が減少し、迎角120°では26%推力が増加した。

同一の風速で比較した場合、いずれの風速においても回転数の増加によって推力が大きくなっている。一方、同一の回転数で比較した場合、迎角によって風速による推力変化の様子が異なる。迎角70°以上では、風速が速くなると推力が増加しているが、迎角70°未満では、風速が速くなると推力が低下している。

また、図8からピッチングモーメントは、迎角の増加に対して単調増加でないことが分かる。それぞれの条件に対して、迎角95°から105°の区間において、ピッチングモーメントは極大値を示し、その後は迎角の増加によって減少する。風速8m/s、ロータ回転数6000rpmでは、迎角90°の時と比較して、ピッチングモーメントは、迎角60°で53%減少し、迎角105°で極大になり、23%増加した。同じ回転数では、ピッチングモーメントが極大値を示す迎角は、風速が速いほど小さくなった。同じ風速では、ピッチングモーメントの極大値を示す迎角は、ロータ回転数が増加するほど大きくなった。極大値を迎えるまでの迎角45°から90°においては、回転数が大きく、風速が速くなるほど、ピッチングモーメントは増加した。

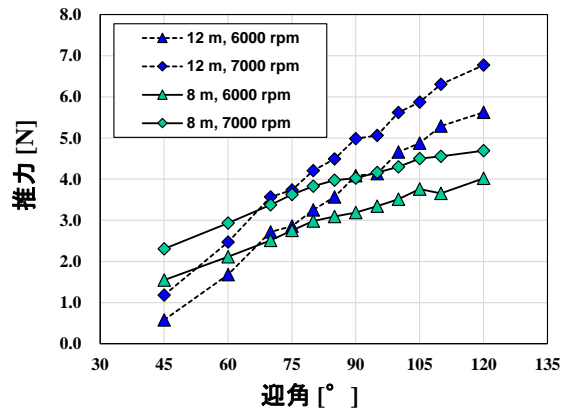


図7 横風下での迎角に対する単独ロータの推力変化

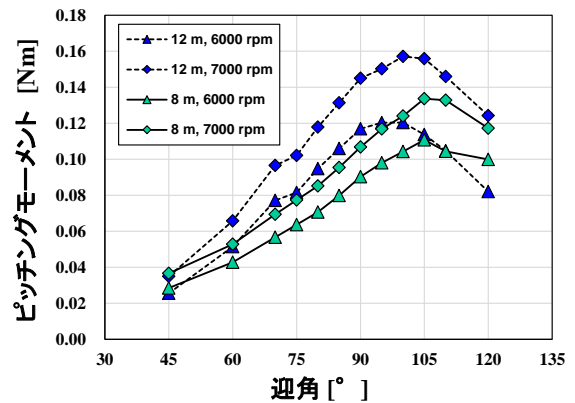


図8 横風下での迎角に対する単独ロータのピッチングモーメント変化

3. 3 考察

実験結果より、ロータに発生する推力は、迎角75°以上では、風速が速く、回転数が大きくなるほど増加することを確認した。また、ピッチングモーメントは、極大値を迎える角度以下において、風速が速く、回転数が大きくなるほど増加することを確認した。

迎角の増加によって推力とピッチングモーメントが増加する原因は、迎角の変化に伴ってロータ面に推力に流入する風の速度変化によるものだと考えられる。ロータ迎角を増加させた場合、ロータ面を垂直に通過する流れの速度は減少するため、推力は増加すると考えられる。同様の理由から、迎角が大きくなった際にピッチングモーメントも増加していると考えられる。また、推力と異なりピッチングモーメントは、ロータブレードが失速状態に陥ることによって、迎角90°以上において、迎角の増大に対してモーメントが減少していると考えられる。

4. ロータ傾斜角による推力とピッチングモーメントの変化量の推定

実験結果に基づいて、ロータ傾斜取り付けによる、横風下でのクアドロータ機の推力とモーメントへの影響を推定した。推定時のクアドロータ機モデルのロータ配置を図9に示す。横風速度を8m/s、ロータ回転数を6000rpmとして、各ロータから作用する力を見積もることで、機体全体に加わる力の推定を行った。

推定には、風速8m/s、6000rpmにおける単独ロータの推力とピッチングモーメントの計測結果から導いた、近似曲線を用いた。図10, 11に計測結果と近似曲線、式1, 2に各近似式を示す。式中の θ_{rotor} は、流れ方向に対するロータ面の迎角[°]を示している。

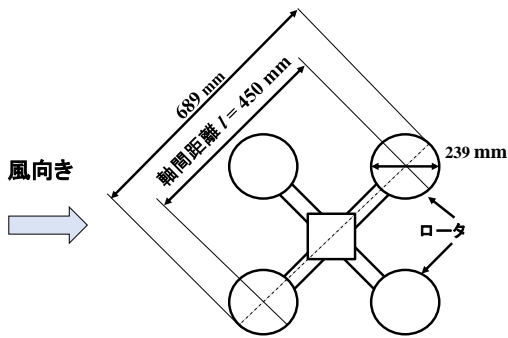


図9 ロータ傾斜角の影響推定時のクアドロータ機モデルの寸法とロータ配置

$$T = a_1 \theta_{rotor}^2 + a_2 \theta_{rotor} + a_3$$

$$a_1 = -1.64 \times 10^{-6}$$

$$a_2 = 6.00 \times 10^{-2}$$

$$a_3 = -8.64 \times 10^{-1} \quad (1)$$

$$M_{rotor} = b_1 \theta_{rotor}^4 + b_2 \theta_{rotor}^3 + b_3 \theta_{rotor}^2 + b_4 \theta_{rotor} + b_5$$

$$b_1 = 6.36 \times 10^{-9}$$

$$b_2 = -1.53 \times 10^{-6}$$

$$b_3 = 1.19 \times 10^{-4}$$

$$b_4 = -4.41 \times 10^{-3}$$

$$b_5 = 4.27 \times 10^{-2} \quad (2)$$

図12にクアドロータ機に加わる力の概念図を示す。

前方と後方のロータに加わる推力とモーメントをそれぞれ、 T_{front} , M_{front} , T_{rear} , M_{rear} とする。また、ロータ軸間距離を l とする。さらに、ロータ傾斜角を θ_{slant} 、機体迎角を θ_{body} とする。推定の際には、ロータの傾

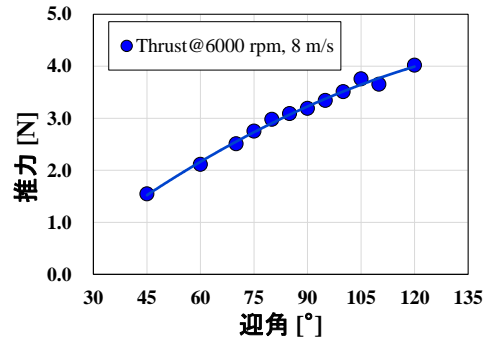


図10 推定に用いた推力計測結果と近似曲線

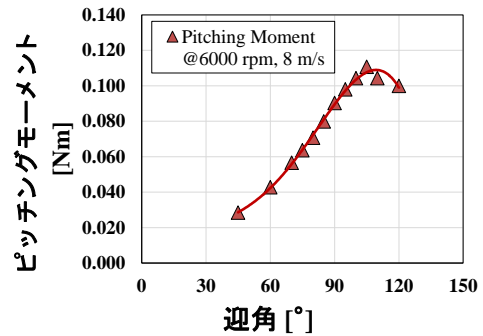


図11 推定に用いたピッチングモーメント計測結果と近似曲線

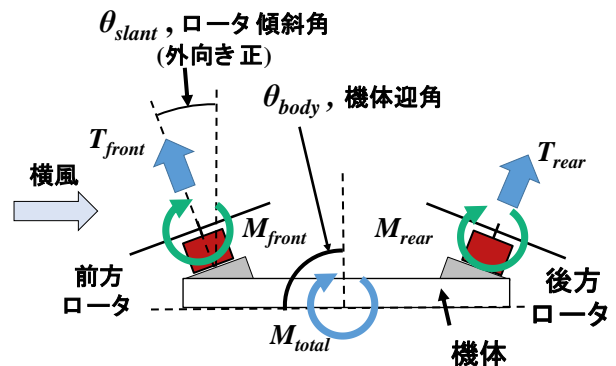


図12 クアドロータ機に加わる力の概念図(側面図)

斜方向に留意する必要がある。概念図では、ロータは同一平面内でのみ傾斜しているように示しているが、実際のクアドロータ機モデルでは、ロータは機体中心から放射状に傾斜している。よって、ロータは機首に対してヨー方向に45°回転している。ピッチングモーメントを計算するには、発生するピッチングモーメントを $\sqrt{2}$ で除することで、図12に示す平面内で取り扱うものとした。式3を用いて推力を求め、式4を用いて機体全体にかかるピッチングモーメントを求めた。

$$T_{total} = 2T_{front} \cos(\theta_{slant}) + 2T_{rear} \cos(\theta_{slant}) \quad (3)$$

$$M_{total} = \sqrt{2}M_{front} + \sqrt{2}M_{rear} + T_{front} l \cos(\theta_{slant}) / \sqrt{2} - T_{rear} l \cos(\pi\theta_{slant}) / \sqrt{2} \quad (4)$$

4. 2 推力とピッチングモーメントの推定結果

式3によって推定した各ロータ傾斜角での機体推力の推定値を図13に示す。ロータ傾斜角-20°から20°では、推力の大きさに差は見られなかった。これは、ロータ推力の迎角に対する変化が、90°を中心とした、迎角60°から120°において線形的に変化しているため、前方側と後方側でのロータ推力の増減が相殺された結果だと考えられる。

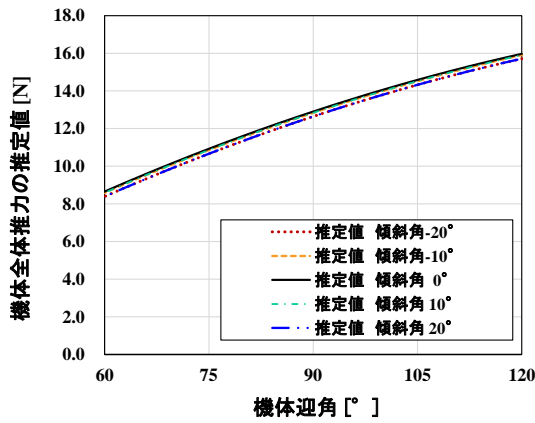


図13 推定モデルにおける機体全体での推力推定結果

式4においてピッチングモーメントは、ロータ間の推力差と、各ロータから発生するピッチングモーメントによって生じる二つのモーメントから成り立っている。図14に、傾斜角0°を基準とした際のロータ間推力差によって生じるピッチングモーメントの変化を示す。同様に、図15に、ロータごとに生じるピッチングモーメントによる機体ピッチングモーメントの変化を示す。さらに、迎角0°を基準とした、全体でのモーメント変化を図16に示す。

図14からは、ロータ間推力差により、ロータを内側に傾けることでモーメントが増加し、ロータを外側に向けることでモーメントが減少することが分かる。この効果は式4における推力が含まれる部分によるもので、ロータと機体重心の距離が大きいほど影響が大きくなると予想される。図15からは、ロータごとのピッチングモーメントの変化により、

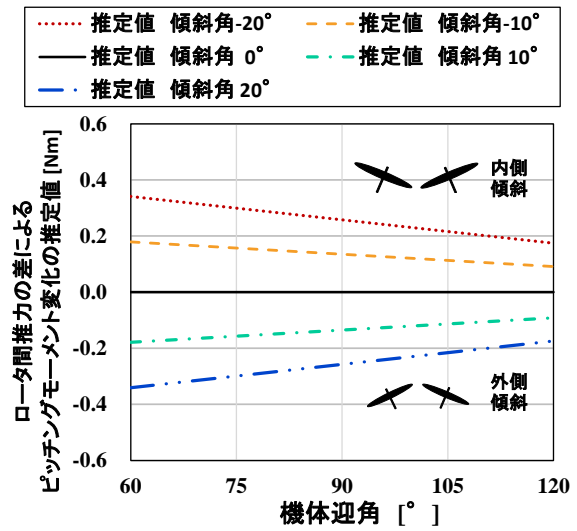


図14 ロータ間の推力差に起因したロータ傾斜によるピッチングモーメント変化の推定値

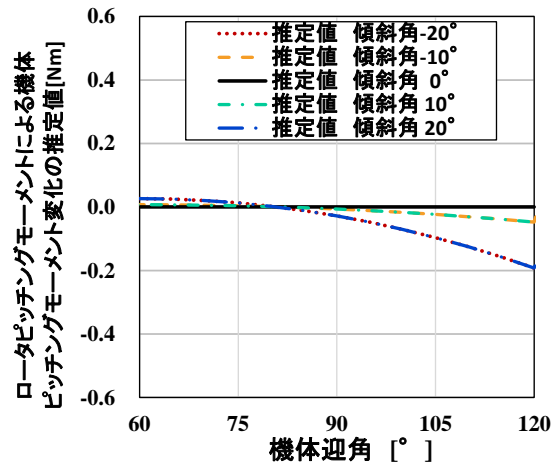


図15 ロータごとのピッチングモーメントに起因したロータ傾斜によるピッチングモーメント変化の推定値

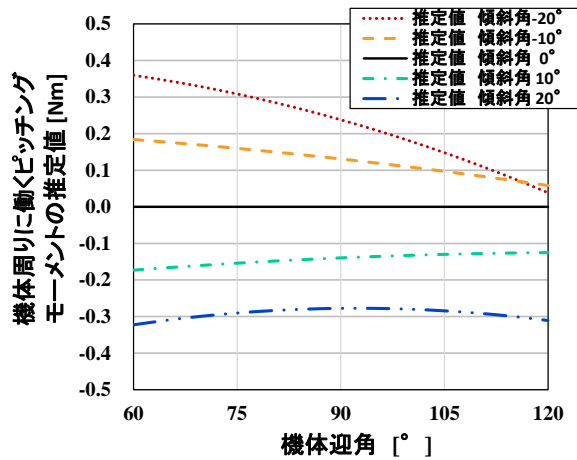


図16 推定モデルにおける機体全体でのピッチングモーメントの変化量の推定値(ロータ傾斜角0°を基準とする)

特に迎角 90° 以上でモーメントが減少することが分かる. 図 1 6 によれば, 二つの効果により, 外側傾斜時には機体迎角に対して, ほぼ一定のモーメント低減効果が見込まれる.

以上の推定から, 機体迎角 90° 以下において, ロータの推力差により, ピッチングモーメントが減少すると予想される. また, 機体迎角 90° 以上では, ロータごとのピッチングモーメントの減少の効果が加わり, ピッチングモーメントは減少すると考えられる. 機体迎角 90° においては, ロータを外側に 20° 傾斜することで, 機体ピッチングモーメントは 0.3Nm 低下すると予想される.

5. 横風下におけるマルチロータ機模型計測

4 つのロータを取り付けたクアドロータ機模型を用いて, ロータの取り付け角を変化させた際に横風中の機体周りに働く力を計測した. さらに, 4 章で推定したロータ傾斜によるピッチングモーメントの検証を行った. 本実験では, 提案したロータ傾斜によるピッチングモーメントの低減手法の効果を検証することを目的とする

5. 1 実験方法

図 1 7 に風洞と計測模型の位置関係と, 模型周りの様子を示す. クアドロータ機模型は, アルミフレーム製の本体と単独ロータ計測に用いた 4 つのロータにより構成されている. ロータ傾斜角は, ロータ取り付け治具を取りかえることで変化させている. ロータ傾斜角は図 1 2 の定義と同様に, 外向き傾斜時を正方向とする.

風速は, 推定モデルと同様に 8m/s とした. 今回の計測では, ロータの後流によって流路から風が吐き出されるため, ピトー管計測による風速が 8m/s となるように風洞を調整した. クアドロータ機模型のロータ回転数は, 機体迎角 90° , ロータ傾斜角 0° 且つ, ロータ回転数 6000rpm の時の推力と, 各ロータ傾斜角で迎角 90° のときの推力が一致するように回転数を変更した. 同じロータ傾斜角ではロータ回転数は一定としている. ロータ傾斜角は 20° から -20° まで変化させ, 機体迎角は 60° から 120° まで変化させた. 実験条件を表 2 に示す.

単独ロータと同様に, 6 軸力覚センサを用いて 8 秒間計測を行い, 平均値を計測結果とした. 各条件において 3 回計測を行った.

5. 2 実験結果

図 1 8 と図 1 9 に, 風洞試験でのクアドロータ機模型の推力とピッチングモーメントをそれぞれ示

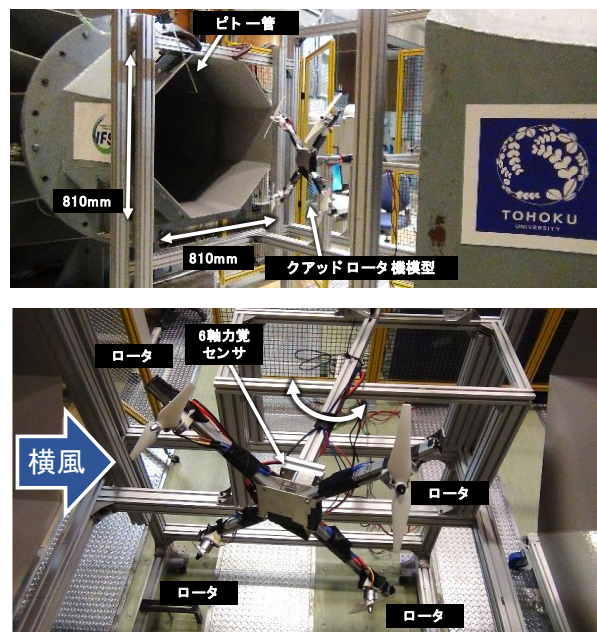


図 1 7 風洞試験での実験装置の配置(上: 風洞と計測模型, 下: 模型詳細)

表 2 クアドロータ機模型計測の実験条件

機体迎角	$^\circ$	$60 - 120$
ロータ傾斜角	$^\circ$	$-20, -10, 0, 10, \text{ and } 20$
ロータ回転数	rpm	$6,000^{*2}$
横風風速	m/s	8

各条件において計測は3回実施し, 平均値を計測結果とした.
 $*1$ 15° ごとに計測を行い, 外側傾斜時の一部においては 7.5° ごとに計測を行った.
 $*2$ 発生する推力の大きさを一定にして計測を行うため, ロータ傾斜角が 0° かつ機体迎角 90° の時の推力を基準とし, 各ロータ傾斜角が 90° における推力が, 基準とした推力と一致するように回転数を設定した. 実験時の回転数は次のとおりである. (-20° : 6200rpm , -10° : 6000rpm , 0° : 6000rpm , 10° : 6000rpm , 20° : 6200rpm)

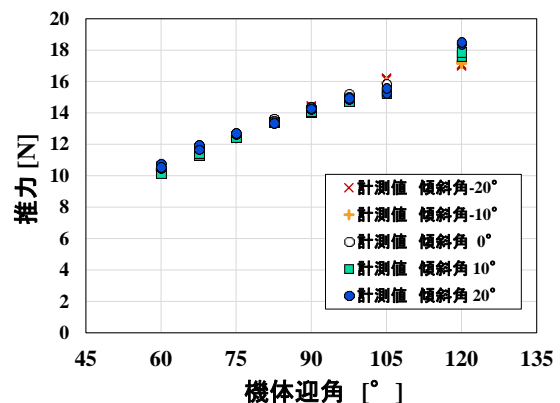


図 1 8 ロータ傾斜させた際の横風下での機体推力

す. ピッチングモーメントについては, ロータ傾斜角 0° の計測結果を基準として, 第 4 章で求めたロータ傾斜角の違いによるピッチングモーメントの推定値を記載した.

図 1 8 に示す機体推力では, ロータ傾斜角による大きな推力差は見られなかった. すべてのロータ傾

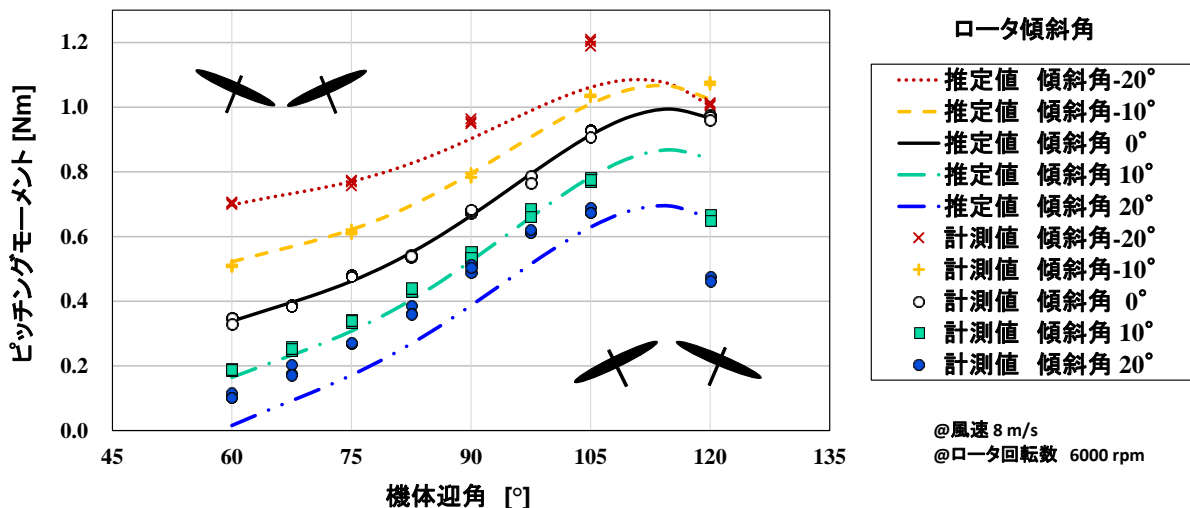


図 19 ロータ傾斜させた際の横風下での機体に働くピッチングモーメント

斜角について、迎角の増加に伴って、推力は増加した。

一方、図 19 に示すように、ロータ傾斜角度の違いにより、機体周りのピッチングモーメントは変化した。同じ迎角では、ロータが内側に傾斜するとピッチングモーメントは増加し、ロータが外側に傾斜するとピッチングモーメントは減少した。また、ロータ傾斜角によるピッチングモーメントの変化幅は、内側傾斜と外側傾斜では異なっていた。機体迎角 90° で比較した場合、ロータ傾斜角 0° から -20° に内側に向けると、ピッチングモーメントが 40% 増加したのに対して、0° から 20° に外側へ向けると 26% の減少にとどまった。同じロータ傾斜角の変化に対して、外側と内側方向では、モーメントの変化幅異なっていた。また、機体迎角 105° 以上では、ピッチングモーメントは迎角の増加により減少した。

5.3 考察

今回の実験では、ロータ傾斜角の推力への影響はほとんど見られなかった。この結果は、3 章での推力についての推定結果と一致する。

また、機体に働くピッチングモーメントは、ロータ傾斜角が外側に傾くにつれて減少した。この傾向は、3 章での推定と一致しており、本論文で提案するロータの外側傾斜によるピッチングモーメントの低減手法を裏付けるものである。一方で、推定したピッチングモーメントの変化量と、実際の計測結果は一部を除いて一致しなかった。迎角 90° 以下において、ロータを内側に傾斜させた場合においてのみ、推定値と計測値はよく一致した。しかし、迎角 90° 以下でロータを外側に傾斜させた場合、計測されたピッチ

ングモーメントは予想された値よりも大きく、ロータ傾斜によるモーメント減少量は推定値よりも小さかった。迎角 105° 以上では、ブレードの失速によって引き起こされたとみられるピッチングモーメントの減少を確認した。この時、ロータを内側に傾斜させた場合のピッチングモーメントの変化量は、概ね一致した。一方、外側に傾斜させた際のピッチングモーメントは、推定値よりも小さくなった。

迎角 105° 以上でピッチングモーメントの計測値と推定値が異なる理由として、各ロータの傾斜角が最大で 140° になっており、単独ロータでの計測角度範囲を超過しているため、近似曲線と実際のロータ特性が一致していないことが挙げられる。機体迎角 60° から 120° での特性を推定するためには、単独ロータにおいて、40° から 140° での特性を計測する必要がある。

また、内側傾斜に比べて、外側傾斜におけるピッチングモーメントの変化量が小さくなっている理由として、ロータ間の後流干渉が挙げられる。今回の推定は、独立ロータの特性に基づいて行っているが、横風中のクアッドロータ機では、前方側ロータの後流が後方側のロータに流入していると考えられる。しかし、内側傾斜の場合は図 20 に示すように、後方側のロータへの流入はほとんど見られないと考えられ、ロータ間干渉の影響は小さいと思われる。対照的に外側傾斜の場合には、前方側ロータの後流が後方側ロータに流れ込むと考えられる。よって外側傾斜では、前方側ロータ後流の影響で、後方側ロータの推力が低下するため、ピッチングモーメントの減少量が予測よりも小さかったと考えられる。

以上のように、クアッドロータ機模型を用いた風

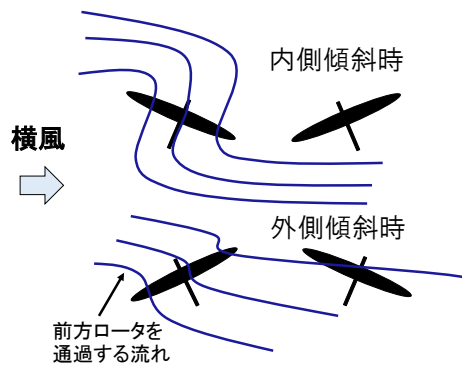


図 20 ロータ傾斜方向の差によるロータ後流干渉の予想図

洞実験により、ロータを外側に傾斜させることで、横風時のピッチングモーメントが低減できることを確認した。一方で、推定されたモーメントの変化よりも、実験で計測されたモーメントの変化は小さく、原因について、今後の検証が必要である。

6. 結言

横風中を飛行するマルチロータ機に働くピッチングモーメントを低減し、強風下でも飛行が可能なマルチロータ機を検討するため、ロータ傾斜によるピッチングモーメントの低減手法の提案と風洞を用いた検証実験を行った。風洞実験では、単独ロータとクアッドロータ機模型に対して、推力とピッチングモーメントの計測を行い、ロータ傾斜によるピッチングモーメントの低減効果を検証した。

単独ロータ計測では、風速が速く、ロータ回転数が大きくなるほど推力が大きくなることを確認した。また、ピッチングモーメントは迎角 105° 付近に極大値を持つことを確認した。

単独ロータの計測結果に基づいて、風速 8m/s 、ロータ回転数 6000rpm でのクアッドロータ機における、ロータ傾斜角が推力とピッチングモーメントに与える影響を推定した。

クアッドロータ機模型試験では、ロータを内側に傾斜させることで、ピッチングモーメントは増加し、外側に傾斜させることでピッチングモーメントが減少することを確認した。迎角 90° 、風速 8m/s において、ロータ傾斜角 0° を基準として、ロータを内側に 20° 傾斜させることで 40% モーメントが増加し、外側に 20° 傾斜させることで、 26% モーメントが減少した。このことにより、本論文で提案したロータ外側傾斜によるピッチングモーメントの低減効果を確認した。

一方で、推定値と計測されたピッチングモーメントの差が見られた。原因として、ロータ間の後流干渉の影響が考えられ、更なる検証実験が必要である。

謝辞

本研究は JSPS 特別研究員奨励費 16J02686 の助成を受けたものです。また、本研究での風洞実験は東北大学流体科学研究所低乱風洞実験室にて、職員の皆様の協力で行われました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) Theys, Bart., Dimitriadis, Gregorius., Andrianne, Thomas., Hendrick, Patrick., and De Schutter, Joris., "Wind tunnel testing of a VTOL MAV propeller in tilted operating mode," *2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems(ICUAS)*, Orlando, FL, USA, pp. 1064-1072, 2014.
- 2) Kuhn, Richard. E., and Draper, John. W., "Investigation of the Aerodynamic Characteristics of a Model Wing-Propeller Combination and of the Wing and Propeller Separately at Angles of Attack Up to 90 Degrees," NACA Technical Report, 1263, 1956.
- 3) Leishman, Gordon J., *Principles of helicopter aerodynamics*, Cambridge university press, 2006.
- 4) Russell, Carl. R., Jung, Jaewoo., Willink, Gina., and Glasner, Brett., "Wind Tunnel and Hover Performance Test Results for Multicopter UAS Vehicles," *American Helicopter Society, 72nd American Helicopter Society International Annual Forum and Technology Display*, West Palm Beach, FL, USA, 2016.