

小型クアドロータ機のロータ軸間距離と地面効果の関係の検証

Investigation on Relationship between Rotors Axis Length and Ground Effect on a Small Quadrotor UAV Performance

○学 河野将佳 (東北大) 正 大塚光 (東北大)
桐林星河 (東北大) 正 永谷圭司 (東北大)

Masayoshi KOHNO, Tohoku University, masayoshi@frl.mech.tohoku.ac.jp
Hikaru OTSUKA, Tohoku University, h-otsuka@frl.mech.tohoku.ac.jp
Siga KIRIBAYASHI, Tohoku University, seiga@frl.mech.tohoku.ac.jp
Keiji NAGATANI, Tohoku University, keiji@niche.tohoku.ac.jp

Small multirotor unmanned aerial vehicles (UAVs) are convenient for multiple applications because they can hover and vertically take off and land. However, their posture in landing motion is unstable because of ground effect. However, ground effect on small quadrotor UAVs has been unclear compared to that of an isolated rotor. To examine the ground effect on small quadrotor UAVs, we measured thrust of a UAV model changing height from ground. In our experiment, we confirmed that thrust of the UAV was affected by ground effect at height below three times of the rotor radius. Moreover, we verified that diagonal rotor axis length changed thrust and hover efficiency in ground effect.

Key Words: Quadrotor UAVs, Ground Effect, Rotor Aero Dynamics

1 緒言

無人航空機の中でも複数の回転翼を持つ小型マルチロータ機は、垂直離着陸やホバリング飛行が可能であるという特徴を持つ。小型マルチロータ機は小型で安価であることから、期待される用途は多岐にわたる。近年では、被災屋内探査において、小型マルチロータ機の利用が試みられてきた [1]。マルチロータ機の運用において、マルチロータ機が着陸する際に、ロータ後流と地面の間で地面効果が発生し、機体姿勢が不安定になることが知られている。地面効果が生じる際には、ロータ推力が不規則に変化するため、推力制御に意図しない入力を与えられることから、機体が不安定となると考えられる。このように着陸挙動が不安定になることで、目標位置への正確な着陸が困難となるだけでなく、着陸時に機体が転倒し、マルチロータ機が破損することも予想される。これらの問題点を解決するためには、地面効果の着陸への影響を検証し、着陸挙動を安定化させる対策が求められる。

地面効果がロータに与える影響については、これまで、有人ヘリコプタを対象とした研究が行われてきたが [2]、小型マルチロータ機のように複数の小型ロータが近接して存在する状態が地面効果に与える影響に関しては、これまで十分に検証されていない。そこで本研究では、4つのロータをもつクアドロータ機について、地面効果を受けた際にロータ軸間距離が推力とホバリング効率に及ぼす影響を解明することを目的とした空気力計測実験を行った。本稿では、地面効果を受けている単独ロータの推力とトルクの計測ならびに、ロータ軸間距離を変化させた際のクアドロータ機の推力変化とホバリング効率の変化について報告する。

2 回転翼の地面効果およびホバリング効率

2.1 単独ロータの地面効果

Fig.1 に地面効果を受けた際のロータ周りの流れの状態を示す。単独ロータが地面効果を受けた際のロータ推力と地面からの高さの関係は、Cheeseman らによって関係式が示されている [2]。この単独ロータの推力 T と地面高さ h の関係式を式 1 に示す。

$$\frac{T}{T_{out}} = \frac{1}{1 - (R/4h)^2} \quad (1)$$

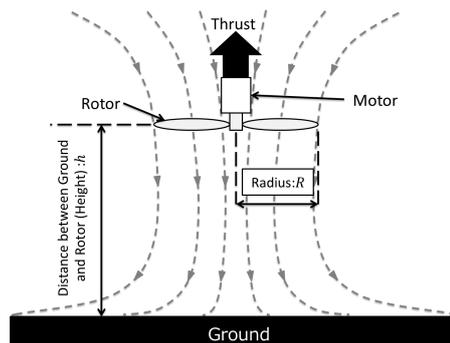


Fig.1 Rotor and flow around rotor in ground effect

$$\left\{ \begin{array}{l} T : \text{任意の地点での推力} \\ T_{out} : \text{地面効果のない状態の推力} \\ R : \text{ロータ半径} \\ h : \text{地面とロータ間の距離 (高さ)} \end{array} \right\}$$

式 1 はロータのパワー一定の条件下において、地面効果を受けていないときの推力を基準として、地面効果を受けたときの推力の比を表している。式 1 により、地面とロータが近づくにつれてロータの推力が上昇することがわかる。特にロータ直径よりも h が小さい場合、推力が急激に上昇し、 $0.5R$ の高さでは推力が約 30% 増加する。したがって、機体が地面にロータ直径程度の高さで飛行する際にロータ推力が上昇する。

2.2 回転翼のホバリング効率

ホバリング効率とは理想的なホバリングに必要なパワーと実際にホバリングに必要なパワーの比であり、Figure of merit (FM) で表される。 FM はロータの推力係数とパワー係数から算出される。ロータの推力係数とパワー係数は、ロータの半径と回転数、そして実際の推力とパワーから導出される。回転翼に関する理論 [3] によれば、ロータの推力係数 C_t とロータのパワー係数 C_p は次式で求められることが知られている。

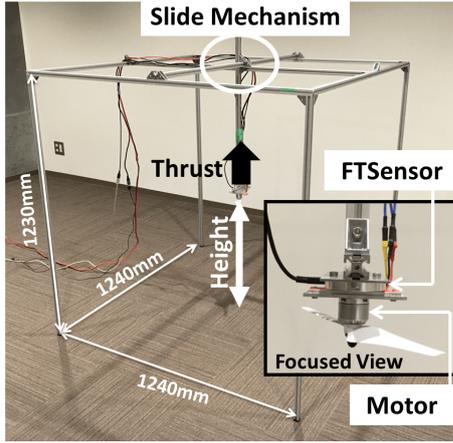


Fig.2 Experimental equipment of isolated rotor

$$C_t = \frac{T}{\rho \pi R^4 \omega^2} \quad (2)$$

$$C_p = \frac{Q\omega}{\rho \pi R^5 \omega^3} \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T : \text{ロータの推力} \\ Q : \text{ロータのトルク} \\ \rho : \text{主流密度} \\ R : \text{ロータ半径} \\ \omega : \text{ロータの回転角速度} \end{array} \right\}$$

FM は式 2 と式 3 も用いて次式により求めることができる。

$$FM = \frac{C_t^{3/2}}{\sqrt{2}C_p} \quad (4)$$

以後では、ホバリング効率として FM を用いる。

3 単独ロータの地面効果測定

4つのロータが接近しているクアッドロータ機の地面効果と比較するため、単独ロータの地面効果を受けた状態のロータ推力とトルクの測定を行った。

3.1 実験方法

実験装置を Fig.2 に示す。推力の計測はロータの直上に 6 軸力覚センサを取り付けて測定した。Table.1 にセンサの仕様を示す。ロータの高さは実験装置上部のスライド機構により調整した。ロータの回転数はスピードコントローラで制御し、コンピュータからの指令値により目標値でロータを回転させることができる。実験で用いたロータは直径 239mm で、市販のマルチロータ機に使用されているものを使用した。

ロータ回転数は 6000rpm とし、地面からのロータの高さを $h=60\text{mm}$ から $h=840\text{mm}$ まで変化させた。各条件における計測を 3 回行い、測定の実験条件を Table.2 に示す。

3.2 実験結果と考察

実験結果を Fig.3 と Fig.4 に示す。Fig.3 には推力の測定値と式 1 による理論曲線を示している。ただし本実験ではパワーでは

Table 1 Specification of FT sensor

力定格	モーメント定格	分解能
10N	0.5Nm	1/2000

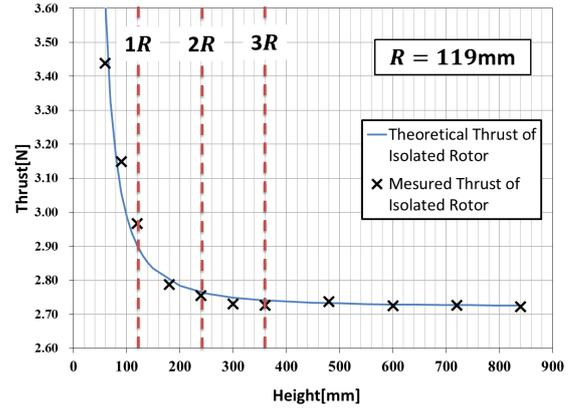


Fig.3 Thrust of isolated rotor

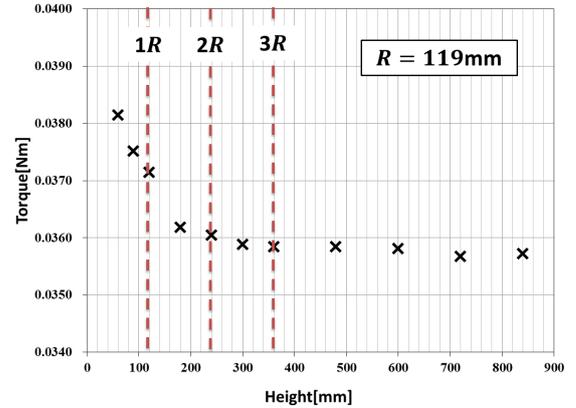


Fig.4 Torque of isolated rotor

なくロータ回転数を一定としているため、式 1 を適用できないが、参考値として記載した。Fig.4 はトルクの測定値を示す。

Fig.3 より、ロータ直径とほぼ同じ $h=240\text{mm}$ 以下の高さから推力の変化が顕著になっていることがわかる。また Fig.4 でも、 $h=240\text{mm}$ 以下の高さからトルクの変化が顕著になっていることがわかる。このことから、実験で使用するロータでは、地面効果が $h=240\text{mm}$ 以下の高さで影響が出ることがわかった。また、Fig.3 と Fig.4 から、高さが $h=240\text{mm}$ から低くなるにつれて推力とトルクはともに上昇することがわかった。

以上の結果から、単独ロータにおける地面効果の影響を確認した。

4 クアッドロータ機の地面効果測定

クアッドロータ機模型を用いて、ロータ間の流れ干渉が存在する状態の地面効果が推力と FM に与える影響を検証した。また異なる軸間距離に関して、推力とトルクに着目し測定を行った。

4.1 実験方法

実験装置を Fig.5 に示す。計測では 2 つの力覚センサを用いて、模型全体にかかる推力とロータの推力とトルクを測定した。各力覚センサは、模型と支柱の接続部とロータ上部に取り付けた。力覚センサの仕様を Table.3 に示す。ロータ後流と機体を支持する

Table 2 Conditions of experiment on isolated rotor

ロータ半径 R	119mm
ロータ回転数	6000rpm
計測高さ h の範囲	60mm-840mm

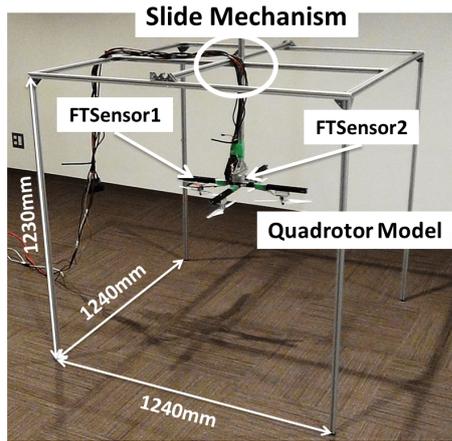


Fig.5 Experimental equipment of quadrotor UAV model

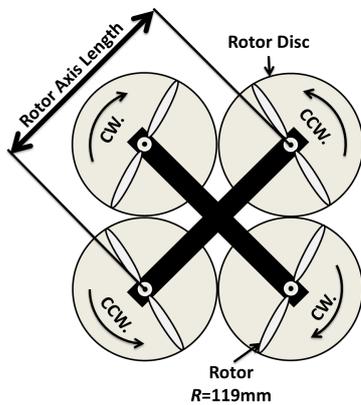


Fig.6 Definition of rotor axis length

フレームとの干渉を避けるため、機体模型の各ロータは、フレーム下部に取り付けた。クアドロータ機上での軸間距離を Fig.6 のように定義し、ロータ軸間距離を 340, 390, 450, 680mm として、地面効果を受けたときの模型全体での推力およびロータの推力とトルクの測定を行った。計測手順は、3.1 節で示した実験と同様とし、同じロータ回転数と地面からの高さの範囲で計測を行った。Table.4 に実験条件を示す。なおロータ軸間距離 340mm は、ロータが接触しない限界距離、390mm と 450mm はロータ直径 239mm のクアドロータ機で使用されている軸間距離、680mm は近接するロータとの距離がロータ直径の倍となり、ロータ間の流れの干渉が無視できるとされる軸間距離である [4]。

4.2 実験結果

クアドロータ機模型全体にかかる推力と高さの関係を Fig.7 に、クアドロータ機模型のロータの推力と高さの関係を Fig.8 に、クアドロータ機模型のロータのトルクと高さの関係を Fig.9 に示す。ただし、各軸間距離の測定日は異なっており、測定日の違いにより同一条件であっても測定結果に差が見られることがわかっている。したがって、各軸間距離同士の測定値をそのまま比較することはできない。よって、以降では測定値を正規化することで測定結果の比較を行う。

Table 3 Specification of FT sensor

	力定格	モーメント定格	分解能
力覚センサ 1	10N	0.5Nm	1/2000
力覚センサ 2	100N	2Nm	1/4000

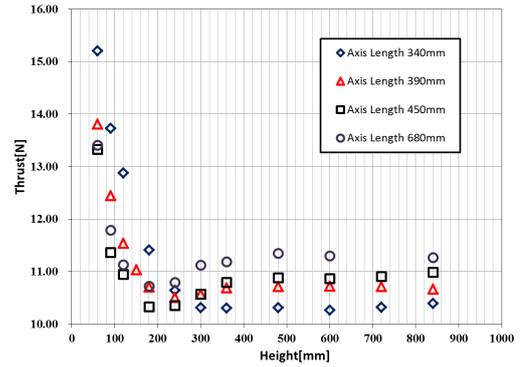


Fig.7 Thrust of entire model on quadrotor model

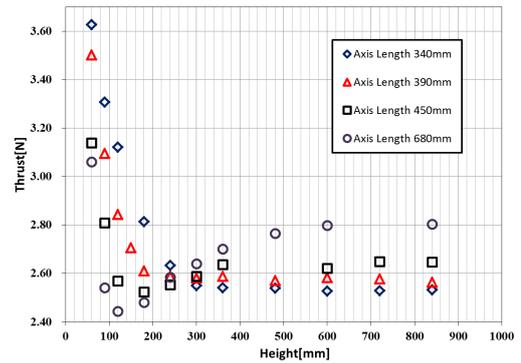


Fig.8 Thrust of a rotor on quadrotor model

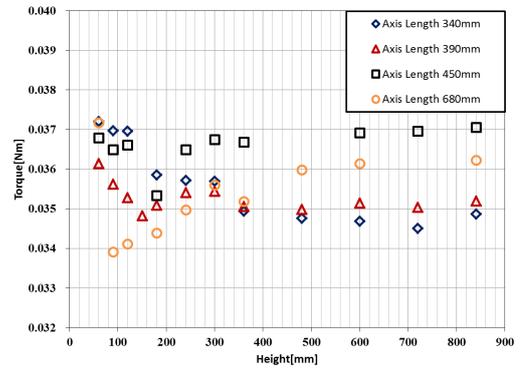


Fig.9 Torque of a rotor on quadrotor model

Fig.3 と Fig.7 に関して、地面効果による推力の変化に着目するため、 T_{out} で任意の高さでの推力を正規化したグラフを Fig.10 に示す。ただし、 T_{out} は Fig.3 と Fig.7 での推力変化が 1%以内となる $h=840\text{mm}$ での推力である。また算出した FM のグラフを Fig.11 に示す。

まず推力変化について着目する。Fig.10 から、軸間距離 340mm では、単独ロータと比較するとより高い位置で地面効果の影響を受

Table 4 Conditions of experiment on quadrotor model

ロータ半径 R	119mm
ロータ回転数	6000rpm
計測高さ h の範囲	60mm-840mm
軸間距離	340, 390, 450, 680mm

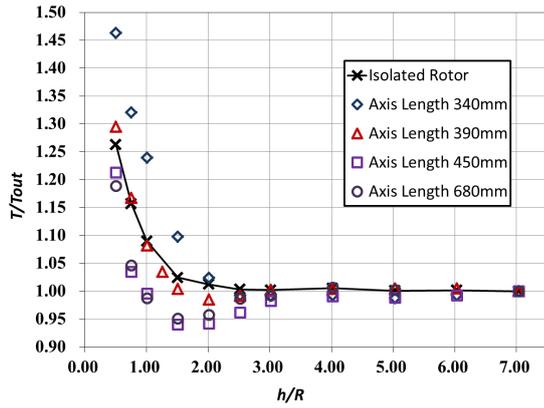


Fig.10 T/T_{out} vs h/R on isolated rotor and quadrotor model

け、推力が増加していることがわかる。また $h/R=0.50$ では、単独ロータの測定値と比較すると T/T_{out} は 20%ほどクアドロータ機の方が大きくなった。軸間距離 390mm では、単独ロータの推力変化と類似した傾向を示している。次に軸間距離 450mm では、高さを低くしていくと、 $h/R=3.0$ で推力の減少が始まり、 $h/R=1.5$ 付近で極小値を示し、 $h/R=1.5$ 以下では、推力が増加した。また軸間距離 680mm での推力変化の傾向は、軸間距離 450mm とほぼ一致していた。一方、異なる軸間距離において機体全体での推力を比較すると、推力変化が顕著となる $h/R=3.0$ 以下では、軸間距離によって高さによる推力変化の傾向に違いが見られた。軸間が狭い 340mm の場合には、単独ロータよりも T/T_{out} が大きい。軸間が広い 450mm と 680mm の場合には、単独ロータよりも T/T_{out} が小さくなった。また、軸間距離 340mm と 390mm では、 $h/R=0.50-3.0$ の範囲において T/T_{out} は単調減少するのにに対し、軸間距離 450mm と 680mm での推力変化では、極小値が現れた。

次に FM について着目する。Fig.11 から、 $h/R=3.0$ 以下の高さから FM の変動が顕著になり始めていることがわかる。このことから、クアドロータ機の地面効果が $h/R=3.0$ 以下から発生することが確認できる。また、軸間距離 340mm, 390mm, 450mm の 3 つは、 $h/R=3.0$ までの FM がほぼ一致している一方で、軸間距離 680mm は単独ロータの FM とほぼ一致している。軸間距離別の FM 変化に着目すると、軸間距離 340mm では、 $h/R=3.0$ 以下の高さから効率が減少した後に、 $h/R=2.5$ 以下の高さからは増加し、 $h/R=0.5$ では FM が約 0.9 となる。軸間距離 390mm では、 $h/R=1.5$ 以下の高さから FM は上昇し、 $h/R=0.5$ では約 0.9 となる。軸間距離 450mm では、 $h/R=3.0$ 以下の高さから FM が 0.55 まで減少した後、 $h/R=1.0$ 以下の高さからは上昇に転じる。軸間距離 680mm では、 $h/R=3.0$ 以下の高さから FM が軸間距離 450mm と同様 0.55 まで減少した後、 $h/R=1.0$ 以下の高さからは上昇に転じている。

4.3 考察

実験結果より、クアドロータ機では $h/R=3.0$ 以下の高さで推力および FM の変化が顕著になっていることがわかる。このことから、クアドロータ機の地面効果は $h/R=3.0$ 付近の高さから影響が出始めることが明らかとなった。また、軸間距離によって T/T_{out} と FM の傾向が異なることが明らかになった。そこで今回は推力変化に着目し、Fig.10 において、軸間距離による T/T_{out} の関係と比較するために、 T/T_{out} の違いが大きい高さ $h/R=1.0, 1.5, 2.0$ の 3 系列をプロットしたグラフを Fig.12 に示す。Fig.12 から、軸間距離が 680mm までは、地面効果を受ける高さの範囲において、軸間距離が大きくなることで、地面効果を受けていない推力よりもロータ推力が小さくなることがわかった。

以上より今回の計測によって、クアドロータ機では地面効果による推力変化と FM 変化が、 $h/R=3.0$ 以下で顕著になり、軸間距離によって T/T_{out} や FM の傾向が変化することを確認した。この結果を踏まえて、着陸挙動を安定化させるためには、いずれの軸間距離においても地面効果の影響を受けない高さを確保で

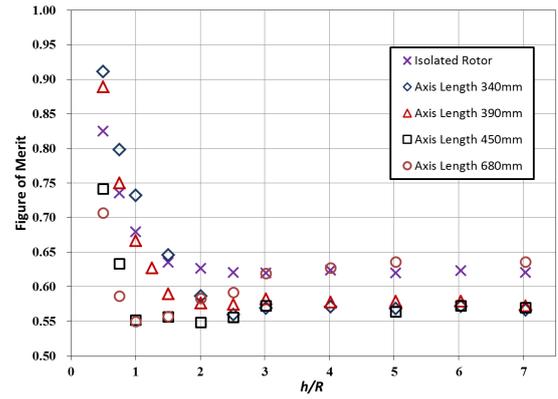


Fig.11 FM vs h/R on isolated rotor and quadrotor model

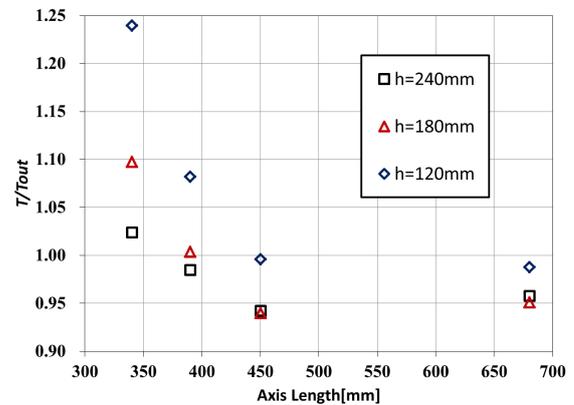


Fig.12 T/T_{out} vs axis length on quadrotor model

きるように、ロータ直径の 1.5 倍程度の長さの脚をクアドロータ機に取り付けることが有効であると考えられる。

5 結論

本研究では、小型クアドロータ機のロータ軸間距離と地面効果の関係について調べるための実験を行った。この実験における計測により、クアドロータ機の地面効果による推力変化量とホバリング効率を定量的に示した。加えてロータ軸間距離の違いにより、地面効果を受けた際の推力変化とホバリング効率の傾向が変化することを確認した。

今後はロータ軸間距離の違いによる地面効果の影響の変化が発生する原因を明らかにするために、クアドロータ機後流の可視化試験を行う。

参考文献

- [1] Nathan Michael, Shaojie Shen, Kartik Mohta, Yash Mulgaonkar, Vijay Kumar, "Collaborative Mapping of an Earthquake-Damaged Building via Ground and Aerial Robots" Journal of Field Robotics Volume 29, Issue 5 September/October 2012 Pages 832-841.
- [2] Cheeseman, I. C. and Bennet, W. E, "The Effect of Ground on a Helicopter Rotor in Forward Flight" ARC R & M 3021, 1955.
- [3] Leishman, J. Gordon, "Principles of Helicopter Aerodynamics", Cambridge University press, 2nd edition, 2006.
- [4] Seokkwan Yoon, Henry C. Lee and Thomas H. Pulliam, "Computational Analysis of Multi-Rotor Flows" 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA SciTech Forum, (AIAA 2016-0812), 2016.