

令和 4 年 9 月 7 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02344

研究課題名(和文) 有人・無人マルチロータ機の安全性向上・周辺への影響評価に関する研究

研究課題名(英文) Research on the enhancement of the safety and assessment of the influences on the surroundings for the manned and unmanned multiple-rotor-type aircraft

研究代表者

砂田 茂 (Sunada, Shigeru)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：70343415

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：(1)ロータブレードの損傷と、ロータ回転面での吹き下しが最大になる半径位置及び、その点での吹き下しの値との関係を明らかにした。さらに本研究とは別に実施した研究結果と統合し、吹き下ろし速度を推定するシステムを完成させた。(2)クアドロータドローンについてモータ故障時の垂直オートロテーションの方法を提案した。(3)回転翼からの騒音の低減と空力性能の向上の両立を目指すロータブレード設計法を検討した。(4)マルチロータ型のeVTOLやドローンについて、中央の胴体の有無による地面効果内での性能変化や流れ場の変化に着目して解析を行った。特に、地面に沿うアウトウォッシュについて知見を整理した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

(1)吹き下ろしの提案推定手法を利用することで、損傷の直接推定や損傷や飛行環境の変化によるダイナミクス変化を補償する新しい飛行制御則の実現が期待できる。(2)クアドロータドローンにおいて1モータの故障が飛行に与える影響は大きい。クアドロータドローンにおける1モータ故障時の安全着陸の手法を提案した。(3)マルチロータ型eVTOLやドローンが、離着陸する際に地面の影響を受け飛行が不安定になりやすいこと、ロータの間の断面においては高高度まで強い風が横に噴き出しており地上人員・物資への影響に注意が必要であることを示した。以上の成果は、マルチロータ型eVTOLやドローンの安全な利用に貢献できる。

研究成果の概要(英文)：(1)It was revealed that the peak value of downwash and its position were affected by the damage level of rotor. The method estimating downwash has been newly proposed.(2) Vertical autorotation was proposed as an emergency landing technique for a multirotor drone suffering a total loss of one motor. The vertical autorotation consists of two phases. In phase 1, all rotors operate in windmill mode. In phase 2, two rotors, including a damaged one, operate in windmill mode while the other two operate in propeller mode.(3)It was revealed that the ground effect of the quadrotor drone shows different trend compared to the conventional single-rotor helicopter. The outwash from each rotor mainly flows along the ground and decays proportional to the individual rotor size, while the outwash from the gap of the rotor is strong up to a higher altitude. This outwash feature should be paid attention to keep the personals or objectives on the ground safe.

研究分野：航空機力学

キーワード：ドローン 空飛ぶクルマ 騒音 風 安全 オートロ テーション マルチロータ機

1. 研究開始当初の背景

ドローン（マルチロータ機）は工学的合理性を有しており、研究開始当初、情報収集、物資輸送等のために、我々の生活空間で使用することが検討されていた。また、有人機ドローンであるドローン型空飛ぶクルマの構想もあり、機体開発が進んでいた。この現状は現在も変わっていない。これらを我々の生活空間に取り込むために、飛行のルール作り、法整備、社会インフラの整備を進める必要があることも、研究開発当初も現在も大きく変わっていない。また、機体に注目すると、我々の生活空間に取り込むためには、機体の安全性向上、周囲環境への影響を適正範囲内に収めることが求められていることも大きく変わってはいない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ドローン、ドローン型空飛ぶクルマを我々の生活空間に取り込むために、安全性向上と周辺への影響評価を取り入れた設計指針の確立である。これまでのドローンの研究開発の多くが制御に関するもので、航空工学固有の学問領域である飛行力学の視点で検討する研究は少ない。また、ドローンでのコレクティブピッチ制御方式を研究しているのは、少数企業と本研究課題申請者グループのみである。さらに、ドローンのモータ故障時にはパラシュートやエアバックの利用を提案する研究者・開発者が多く、オートローテーションによる安全性向上の可能性を検討しているのは、本研究課題申請者グループのみである。これは、本研究課題申請者グループはコレクティブピッチ制御方式を採用するため、オートローテーションの高い効果が期待できるためである。ドローンタイプ空飛ぶクルマの研究開発を進めるグループは多いが、主に機体開発を進めており、周辺への影響の検討をするグループの存在を知らない。日常生活で利用可能な機体を開発するためには、誘起される風、及び騒音が周辺に与える影響を開発の指標に含めるべきである。地面近傍のヘリコプタが周辺に誘起する風については、様々な研究がある（例えば、ヘリコプタのダウンウォッシュが地上の交通機関等に与える影響についての調査・研究報告書、財団法人航空輸送技術研究センタ、2008）。ヘリコプタ周辺の風速はヘリコプタロータの誘導速度に強く依存する。ロータから離れた下方や地面にぶつかった後の風速は誘導速度の2倍程度になる。通常のヘリコプタの誘導速度はロータ面で10m/s程度であるがオスプレの誘導速度は20m/s程度であり、ブラックアウト・ホワイトアウト（砂埃・雪が舞い上がりパイロットの視界が妨げられる）の問題がある。現在提案されている空飛ぶクルマのロータ面での誘導速度は通常のヘリコプタとオスプレの値の間にある。現在提案されている空飛ぶクルマの自重はヘリコプタの自重よりも小さく、空飛ぶクルマの誘起する風が周辺に与える影響は誘導速度だけでは単純に評価できないが、局所の最大風速が上記の様では周辺への影響は無視できない。本研究では周辺者に働く空気力の評価方法を確立し、その評価方法を取り入れた際のドローンタイプ空飛ぶクルマを設計する際の指針を得る。現在検討されている多くの空飛ぶクルマはヘリコプタより自重が小さい。しかし、空飛ぶクルマはヘリコプタよりも、我々の近傍で飛行する。よって、ヘリコプタと同様に騒音は深刻な問題である。本申請研究では、空飛ぶクルマ近傍での騒音を検討し、クルマ諸元と音圧との関係を明らかにする。

3. 研究の方法

安全

(1)ロータの破損

ドローンの吹き下ろし速度がロータの空力特性と強い相関があることに着目し、吹き下ろし速度の非接触測定システムを構築した（図1）。超音波スピーカ、マイクを2セットロータ下部に配置し、吹き下ろし速度に依存する超音波到達時間を推定することで吹き下ろし速度を求める。さらに通常のロータに加えて損傷を有するロータについても吹き下ろし速度推定を行った。ロータ吹き下ろしには擾乱が多く含まれる

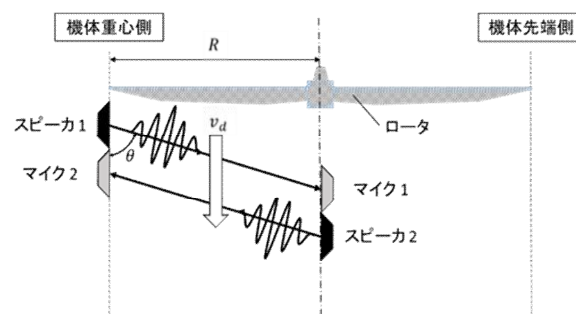


図1 吹き下ろし速度推定システム

ため、超音波の受信波形はその影響を強く受け乱れる。さらにフライトモデルへ実装するには計算負荷の小さなアルゴリズムが望ましい。そこで本研究とは別に実施した拡張カルマンフィルタを使ってむだ時間を推定する手法を本研究結果と統合し、吹き下ろし速度を推定するシステムを完成させた。また、提案手法に加えて熱線流速計を使って吹き下ろし速度分布を計測した。

(2)オートロ テーション

運動解析には空気力の評価が必要である。空気力の評価は、翼素理論・運動量理論(運動量理論の成立しない沈下飛行時には実験データを利用)によった。翼素理論・運動量理論によって得られた空気力が、宇宙航空研究開発機構田辺らが開発した rFlow3D (CFD) での値と一致する様、翼素理論・運動量理論で利用する翼型データを修正した。

周辺への影響

(1)騒音

宇宙航空研究開発機構田辺らが開発した rFlow3D(空気力解析)と rNoise (騒音解析) プログラムを使用し、解析的検討を行った。騒音測定も行い、解析手法の妥当性を確認した。

(2)風

宇宙航空研究開発機構田辺らが開発した rFlow3D(空気力解析)を使用し検討を行った。マルチロータ型ドローンからのダウンウォッシュと地面近くで飛行する場合の周辺への風の広がりについては 図 2 に示す可変ピッチ制御の 4 ロータの全備重量 7 kg のドローンを検討対象に選び、図 3 に示すように、特に空力的に重要なロータブレードと機体中央にある胴体で構成される解析モデルを構成して、地面からの高さを変えながら、性能の変化と流れ場の様子を観察した。



図 2 検討対象であるクワッドロータドローン

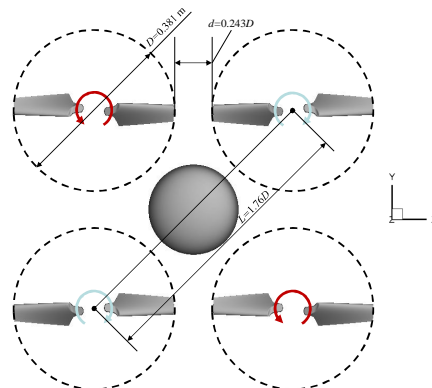


図 3 解析モデル(全備重量 7 kg)

4. 研究成果

安全

(1)ロータの破損

ロータ回転数が 4800rpm の時に損傷のないロータの吹き下ろし速度を提案手法で推定したところ 8.73m/s であった。一方熱線流速計で計測した超音波経路上の吹き下ろし速度の平均値は 8.50m/s であり、提案手法で精度よく推定されていることが分かった。また、損傷の程度が大きくなるに従い、吹き下ろし速度の推定値の変動が大きくなっていることが確認できた。提案手法を用いてロータ損傷を推定することが可能であることを示す結果が得られた。

(2)オートロ テーション

ドローンにおいてモータが 1 つ故障した際の影響は、ロータ数が最小であるクワッドロータ機で最も大きい。モータがオーバーランニングピッチ機構を有しコレクティブピッチ方式のクワッドロータ機を対象に、モータが故障した際の安全な着陸飛行を提案した。その飛行は下記の様に 2 つのフェーズからなる。

(フェーズ 1) 図 4(a) に示す様に、故障したモータを含む全モータをオフにし、ロータのコレクティブピッチを下げ、風車モードで回転させる。コレクティブピッチは、定常沈下速度が最も小さくなる値とする。

(フェーズ 2) 図 4(b) に示す様に、故障したモータとその対角にあるモータはオフにし、それにつながったロータは風

車モードで駆動する。この時のコレクティブピッチはフェーズ1での値と同一である。残りの2つのモータは、通常のプロペラモードで駆動する。この時のコレクティブピッチは下記、逆流領域が広がらないうちに、沈下速度を0に近づけられる値とする。フェーズ2においては、ロータに働く空気力ヨーイングモーメントによって機体がヨー軸回りに回転する。このことによって、モータで駆動されるロータには逆流領域が発生する様になり、ロータが十分な推力を発生できなくなる。このため、フェーズ2は短時間で終了させる必要がある。この短時間の間に、沈下速度を0付近まで減速する必要がある。

フェーズ1において沈下速度が収束した時にフェーズ2に移行し、沈下速度が0に近づいた時、フェーズ2を終了する。この時の全沈下高度をドローンの「安全高度」と呼ぶことにする。この高度より高い高度でモータが故障した時は、フェーズ1の時間を延長すれば良い。一方、この高度より低い高度でモータが故障した時は、まずフェーズ1を短くすれば良い。フェーズ1での最終沈下速度すなわちフェーズ2開始時の沈下速度が、安全高度でモータが故障したケースでのフェーズ1での最終沈下速度よりも小さいため、フェーズ2の時間も同ケースにおける時間よりも短くなる。上記、モータ故障時の飛行高度と「安全高度」の大小とフェーズ1、2の時間配分との関係を図5に示す。フェーズ1では、コレクティブピッチで姿勢制御を行い、フェーズ2ではヨー軸回りの機体の回転によって姿勢が安定化する。本成果は論文にまとめ投稿中である。

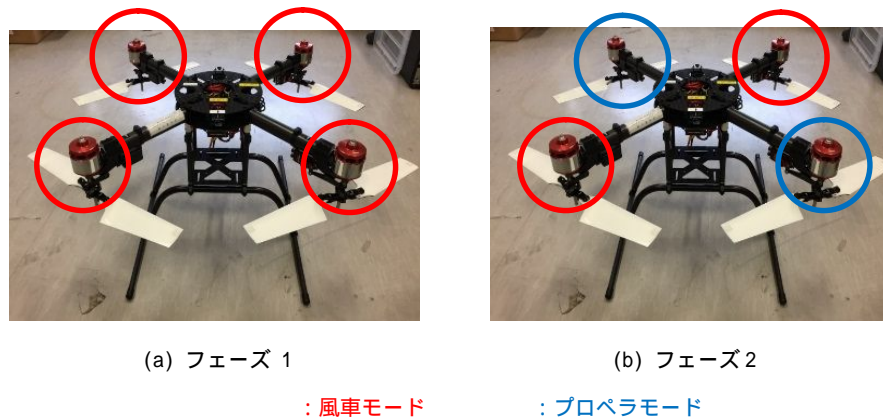


図4 垂直オートロ テーション中の2つのフェーズ, (a)フェーズ1と(b)フェーズ2

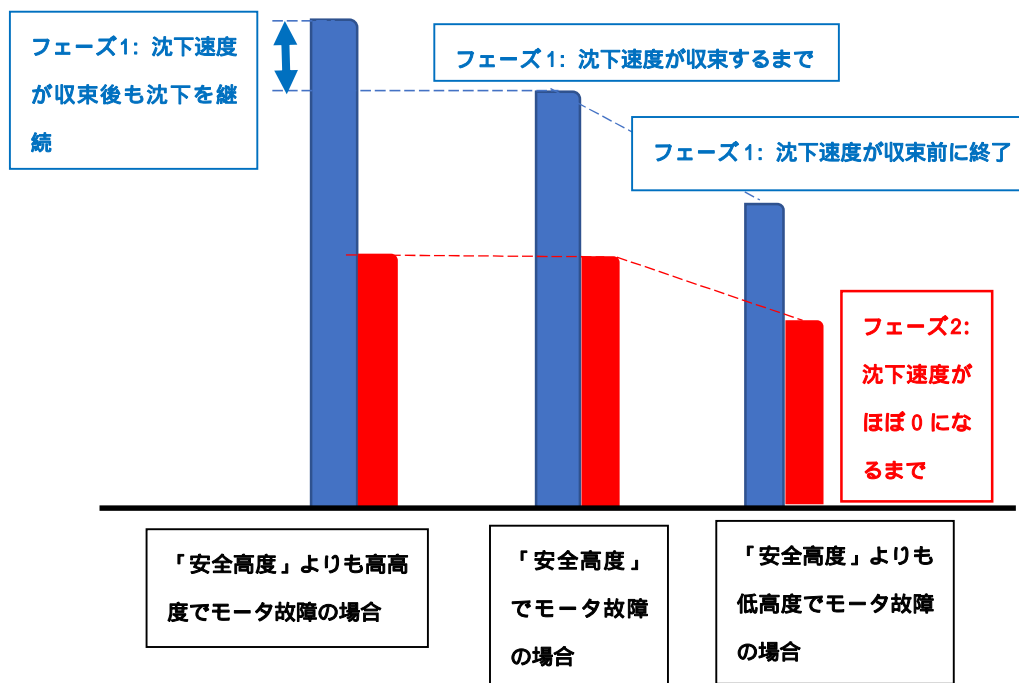


図5 モータ故障時の飛行高度とフェーズ1、フェーズ2の時間配分との関係

周辺への影響

(1)騒音

宇宙航空研究開発機構田辺等の開発した CFD ソフト rFlow3D と騒音評価ソフト rNoise を利用し、ロータの空力性能とロータ周りの騒音を評価した。ロータ周りの騒音については測定との比較を行い、計算と測定の一致度と騒音の測定場所との関係を確認した。さらに、4つの2重反転ロータを有する400kgの空飛ぶクルマについて、空力性能、騒音の両面を考慮した設計方法を検討した。この成果は、本研究が終了後に整理し、公開予定である。

(2)風

マルチロータが地面近くで飛行する場合、ロータ同士の干渉も伴い、在来のシングルロータのヘリコプタと比較して、非常に複雑な流れ場を形成している。図6に地面からの高さがロータ直径の0.25倍、1.0倍、3.0倍の地面近くで形成された渦の様子を示す。直径0.25倍の高さでは、ロータの一部が渦流の中に埋もれ、ロータの性能が局所的に劣化する。この高さ周辺では、安定したロータ推力が発生できないことを示しており、マルチロータ型ドローンが地面に近いところでは飛行安定性が劣化する一因である。

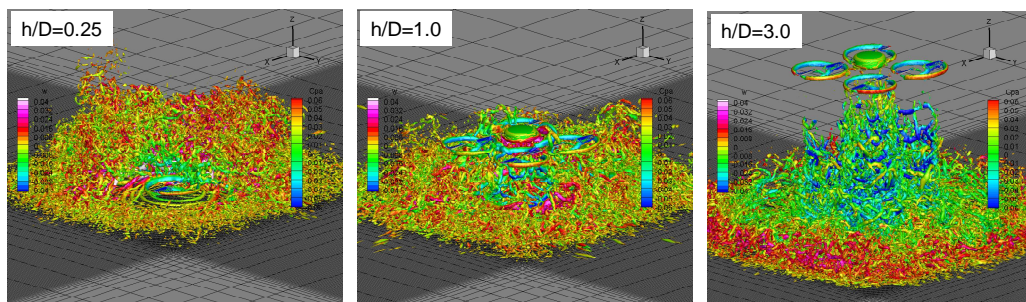
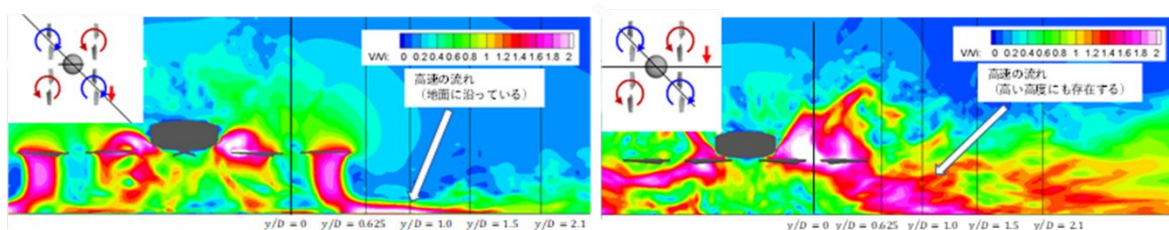


図6 地面からの高さに伴うクワッドロータドローン周りの流れ場変化



(a)対角ロータ中心を通る断面における速度分布

(b)ロータの間の断面における速度分布

図7 クワッドロータドローンの断面における地面に沿う流れ場の様子

また、クワッドロータドローンが誘起する周辺への吹き出し流れ（アウトウォッシュ）の様子も複雑であるが、図7(a)に示す対角ロータ中心を通る断面における速度分布はシングルロータが誘起する流れとよく似ており、地面にそって広がっていく。しかしながら、図7(b)に示すように、ロータ間の断面においては、外への吹き出しが高いところまで速い流れが及び、この現象は在来のヘリコプタと顕著に異なるところで、地上における人員や物体への影響が懸念され、特に注意が必要である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yasutada Tanabe, Hideaki Sugawara, Shigeru Sunada, Koichi Yonezawa, and Hiroshi Tokutake	4. 巻 33
2. 論文標題 A Quad-Rotor Drone Hovering in Ground Effect	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 339,347
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/jrm.2021.p0339	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 田辺安忠、菅原暎明、砂田茂、得竹浩、米澤宏一
2. 発表標題 マルチロータの地面効果に関する数値シミュレーション
3. 学会等名 第58回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 廣瀬将輝、前田翔太郎、砂田茂、山口皓平、田辺安忠、得竹浩、米澤宏一
2. 発表標題 空飛ぶクルマの空力騒音解析
3. 学会等名 第58回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡本涼太、廣瀬将輝、砂田茂、山口皓平、田辺安忠
2. 発表標題 空飛ぶクルマの実用化に向けた音圧環境解析に関する研究
3. 学会等名 日本航空宇宙学会第57回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuhiro Fukuda, Soshi Okada, Hiroshi Tokutake, Shigeru Sunada, Yasutada Tanabe and Koichi Yonezawa
2. 発表標題 Surrounding Environment Estimation of Drone for Wall Collision avoidance
3. 学会等名 2019 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koichi Yonezawa, Kazuki Akiba, Hao Liu, Hideaki Sugawara, Yasutada Tanabe, Hiroshi Tokutake, and Shigeru Sunada
2. 発表標題 On-board Downwash Speed Estimation of Drone Rotor Based State Observer
3. 学会等名 ASIA Pacific International Symposium on Aerospace Technology (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	得竹 浩 (Tokutake Hiroshi) (80295716)	金沢大学・フロンティア工学系・教授 (13301)	
研究分担者	田辺 安忠 (Tanabe Yasutada) (80724799)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・主幹研究開発員 (82645)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------