

令和 5 年 6 月 2 日現在

機関番号：13301  
研究種目：基盤研究(C)（一般）  
研究期間：2020～2022  
課題番号：20K04918  
研究課題名（和文）損傷や外乱の影響を受けるドローンダイナミクスのリアルタイムモデル化手法の開発

研究課題名（英文）Development of a real-time modeling method for drone dynamics under the influence of damage and disturbance

研究代表者  
得竹 浩（Tokutake, Hiroshi）  
金沢大学・フロンティア工学系・教授

研究者番号：80295716  
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：マルチロータ機の安全な運用に資する損傷推定システムの開発を行った。まず小型超音波送受信機を用いたロータ吹き下ろし速度の推定システムを構築した。さらにロータ・ブレード先端が損傷した機体周りの可視化により損傷の流れ場への影響を解析し、超音波を使った吹き下ろし速度推定値を用いた損傷推定アルゴリズムを構築した。検証実験によりロータ直径の0.9%の損傷を推定アルゴリズムで検出可能であることが確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義  
ドローン（マルチロータ機）が幅広く利用されるようになったが、同時に故障による墜落が発生し人的・物的損害が生じる危険性も高くなった。そこでドローンの飛行においてもっとも重要なデバイスであるロータ・ブレードの損傷検出技術を開発した。超音波を用いてロータ吹き下ろし速度を推定し、さらにそれから損傷を検出する新しい技術である。吹き下ろし速度は機体ダイナミクスを決定する重要なパラメータであり、事故防止のみならず飛行制御への応用など幅広い展開が期待できる。

研究成果の概要（英文）：We have developed a damage detection system that contributes to the safe operation of multirotor aircraft. First, an estimation system for downwash speed of rotor was developed using a small ultrasonic transmitter and receiver. The effect of the damage on the flow field was analyzed by visualizing the area around rotors, and a damage detection algorithm was developed using ultrasonic downwash speed estimation. Verification experiments confirmed that the estimation algorithm was capable of detecting damage of 0.9% of the rotor diameter.

研究分野：航空機力学

キーワード：損傷検出 マルチロータ機 吹き下ろし速度推定

### 1. 研究開始当初の背景

ドローンの利用が拡大するとともに事故防止技術の重要性が認識され始めた。飛行が不可能になる損傷が発生した場合に安全に着陸させるための技術として、オートローテーションの利用やパラシュートを備えることなどが提案されている。一方、事故が発生しても安全な飛行を継続するために、6発以上の冗長なロータを備えることも提案されている。いずれの場合も発生した故障を正確に検出することは必要である。故障検出技術としてはセンサ出力とモデル出力を比較するモデルベースの故障検出や、故障検出のための新たなセンサを付加する手法などが提案されてきた。

### 2. 研究の目的

ドローンのダイナミクスを支配するのは主にロータが発生する推力である。ロータ推力を決定する重要なパラメータは吹き下ろし速度であり、吹き下ろし速度をモデルパラメータとしたドローンダイナミクスのモデリングも提案者によって行われてきた。ドローンの吹き下ろし速度は、周囲の環境やロータ・ブレードの形状などに依存する。そこでロータ・ブレードの損傷を吹き下ろし速度を介して検出することを目指す。また、吹き下ろし速度は超音波を用いた非接触推定手法を適用する。これらを実現するために、吹き下ろし速度を推定する超音波センサシステムを構築する、超音波計測値を用いて吹き下ろし速度をリアルタイム推定可能なアルゴリズムを構築する、損傷ロータ周りの流れ場を理解し吹き下ろし速度推定値から損傷を推定する手法を構築することを目指した。

### 3. 研究の方法

#### 故障モードの定義と流れ場解析

運用中の接触により破損することを想定して、ロータ・ブレード先端が欠ける損傷を対象とする。市販の直径 23cm のロータを採用し、片側のブレード先端が 1mm, 2mm, 10mm 欠ける損傷を有するロータを制作した(図 1)。それらロータを地面から十分離れた場所で回転させ、ロータ周辺の流れ場の様子をスモークと高速カメラを使って可視化した(図 2)。

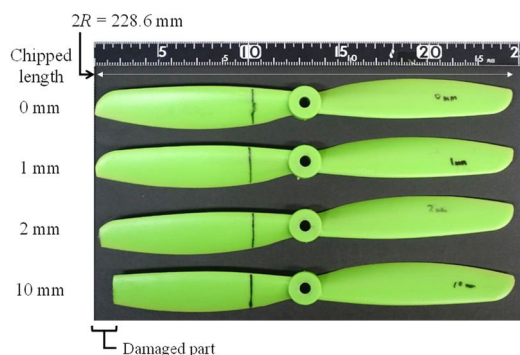


図 1 ロータ・ブレード

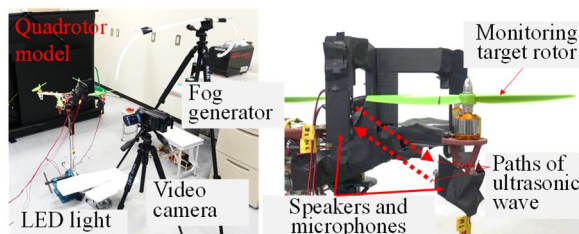


図 2 可視化実験装置

#### センサシステムの構築と伝播時間を使った媒体速度の推定

ロータ下部に超音波送受信機を二組相対する方向に配置し、超音波の伝播時間から吹き下ろし速度を推定するシステムを構築した(図 3)。音速には媒体速度の音波方向成分が足されるため、相対する方向の伝播時間を用いることで、音速情報を利用することなく媒体の速度が求まる。音速が増速する経路方向の伝播時間を $t_{dw}$ 、減速する経路方向の伝播時間を $t_{up}$ とすると、吹き下ろし速度は

$$v_d = \frac{L}{2 \sin \theta} \left( \frac{1}{t_{dw}} - \frac{1}{t_{up}} \right) \quad (1)$$

で与えられる。

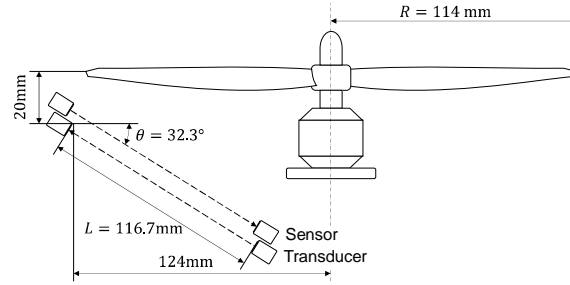


図3 吹き下ろし速度推定装置<sup>[1]</sup>

### 遅れ時間モデルとカルマンフィルタを使った伝播時間推定

超音波の伝播時間を利用した吹き下ろし速度推定では，超音波発信機と受信機との空間を伝播する時間を正確に測定する必要がある．しかしロータ下部の流れは乱れが強く，しきい値や位相差など，受信波形の特徴量を利用して伝播時間を計測する通常の手法では正確な到達時間を得ることができない．そこで外乱入力を含む超音波伝播モデルを新たに構築し，受信波形全体の形状をマッチングすることで計測した信号から伝播時間を推定する実装に適した逐次的アルゴリズムを構築し適用した．

そのためまずむだ時間を状態変数に含む状態空間モデルを新たに構築した．一連のサンプリング点における観測量を状態変数に組み込み，任意のサンプリング点を抽出する窓関数を出力方程式とすることで，窓関数のモデルパラメータで時間遅れを表現することを可能とした（(2)～(6)式）．このモデル構造を線形化しカルマンフィルタを用いて伝播時間入出力間の伝播時間を推定する．

$$x[k+1] = Ax[k] + B_u u[k] + B_v v[k] \quad (2)$$

$$y[k] = h(x[k]) + w[k] \quad (3)$$

$$g(z, a) = \exp\{-M(z - a)^2\} \quad (4)$$

$$F_m(x[k], C, a) = \sum_{i=1}^m \left[ C g\left(\frac{i}{m}, a\right) x_i[k] \right] \quad (5)$$

$$x[k] = [x_1[k] \ x_2[k] \ \cdots \ x_m[k] \ x_{m+1}[k] \ x_{m+2}[k]]^T \quad (6)$$

### 損傷ロータ・ブレードへの適用

(1)～(6)式を使って推定される吹き下ろし速度は，超音波波形が通過した時点の超音波経路上の速度分布の平均値である．流れ場の可視化による理解から，損傷ブレード先端から流れ出た渦の影響により，経路上の吹き下ろし速度分布は変動することが予想される．そこでサンプリング点 $j$ における吹き下ろし速度推定値 $v_{d_j}$ を用いた損傷推定指標 $J_{d_i}$ を導入した（(7)，(8)式）．

$$J_{d_i} = \sqrt{\frac{1}{N+1} \sum_{j=i}^{i+N} (v_{d_j} - \hat{v}_{d_i})^2} \quad (7)$$

$$\hat{v}_{d_i} = \frac{1}{N+1} \sum_{k=i}^{i+N} v_{d_k} \quad (8)$$

## 4．研究成果

損傷していないロータを 4800rpm で回転させたときの超音波経路上吹き下ろし速度分布を熱線流速計で計測した．各半径方向位置での平均値とその標準偏差を示す（図4）． $r/R \cong 0.8$ で流れが大きく乱れていることがわかる．経路上での風速の平均値は 8.50m/s である．また同じ条件において提案した超音波を用いた手法で吹き下ろし速度を推定した．推定速度の時間履歴を図5に示す．推定速度の時間平均は 8.73m/s であり，熱線風速計による測定結果と比べると 2.69%の誤差であり，精度良く推定できることを確認した．

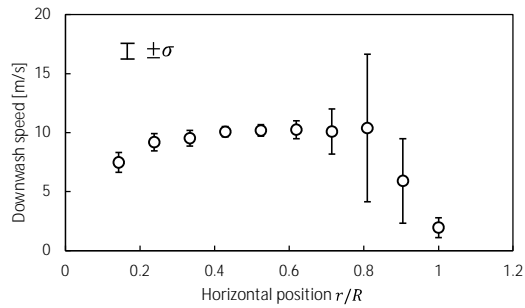


図4 吹き下ろし速度分布（熱線流速計）[1]

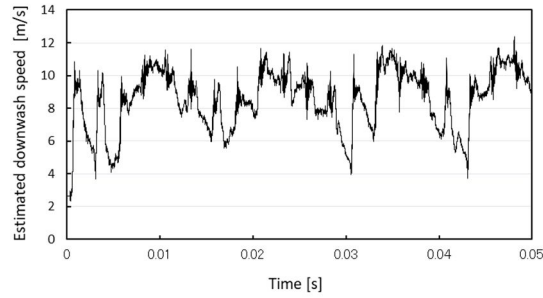


図5 吹き下ろし速度（提案手法）[1]

損傷したロータの各半径方向位置 $r/R$ における熱線流速計による吹き下ろし速度 $v_d$ の計測結果を図6に示す。正常及び1mm欠損のロータは $r/R \cong 0.8$ で流れは大きく乱れているが、2mmおよび10mm欠損のロータは、乱れが大きい領域が先端に移動していることがわかる。同じ条件のロータについて、提案した超音波による手法を適用し、(7)式の損傷推定指標を計算した(図7)。それより、正常なロータ及び1mm欠損のロータは指標の値が低い、2mm以上欠損したロータの指標は大きくなっており、この指標に対して適切な閾値を適用することで損傷を検出できることがわかる。そこで正常なロータに対する超音波受信機の出力履歴と2mm欠損ロータに付いての履歴を結合して、ホバリング中にロータ・ブレード先端が2mm欠損した場合の仮想的な信号履歴を作成し、提案手法によって損傷推定指標履歴を計算した(図8)。仮想的に損傷が発生した時刻で指標が増大し、有意に変化していることがわかる。

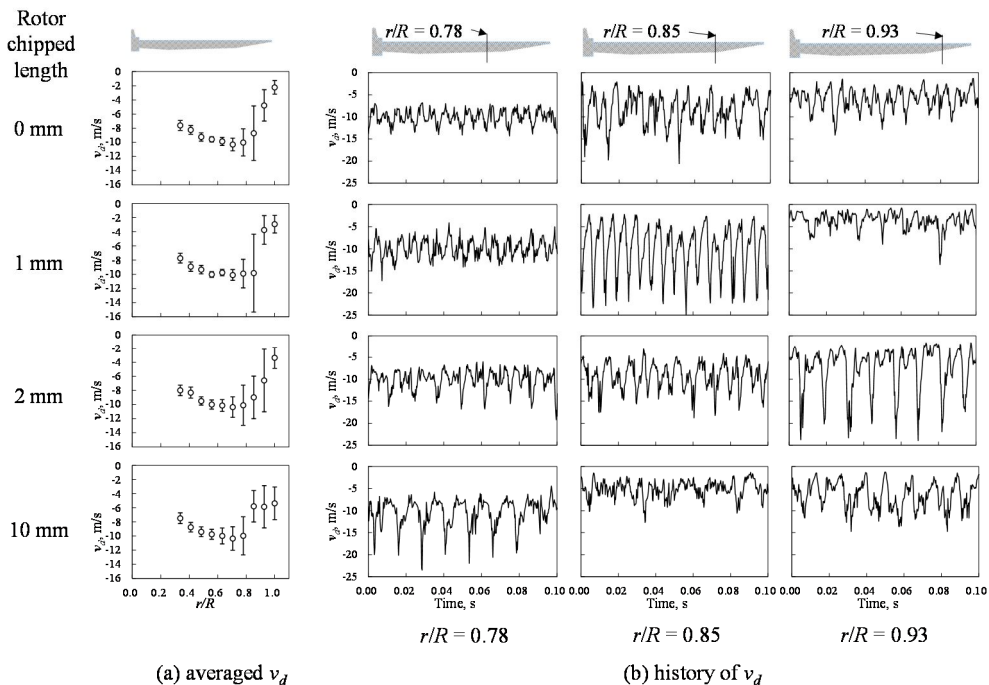


図6 損傷ロータ吹き下ろし速度分布

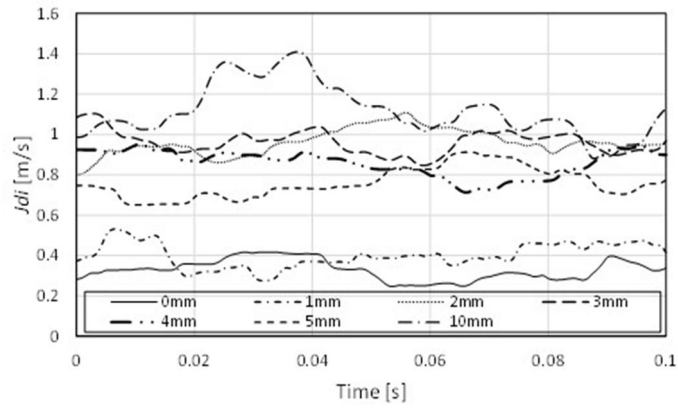


図7 損傷推定指標

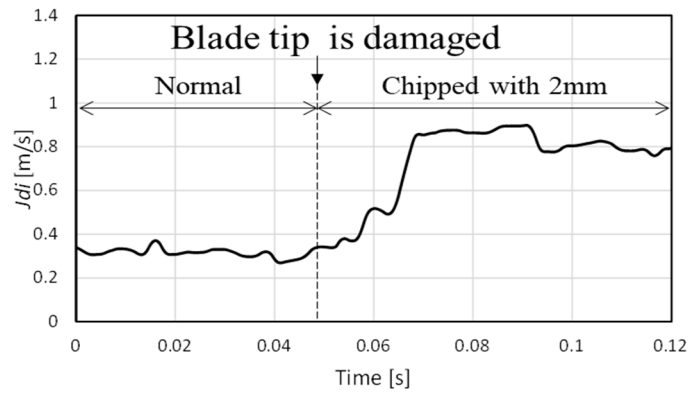


図8 損傷推定指標 (ホバリング中の損傷)

参考文献

- [1] Hiroshi Tokutake, Soshi Okada, Shigeru Sunada, Yasutada Tanabe and Koichi Yonezawa, "On-board Downwash Speed Estimation of Drone Rotor Based State Observer" , Transactions of JSASS, Vol. 65, No. 6, pp.231-236, 2022.

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 Hiroshi TOKUTAKE, Soshi OKADA, Shigeru SUNADA, Yasutada TANABE, Koichi YONEZAWA	4. 巻 65
2. 論文標題 On-board Downwash Speed Estimation of Drone Rotor-Based State Observer	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES	6. 最初と最後の頁 231-236
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2322/tjsass.65.231	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1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 川崎 彰大, 岡田 惣司, 大塚 光, 得竹 浩
2. 発表標題 超音波を用いたマルチロータ機の吹き下ろし速度とロータ損傷の推定
3. 学会等名 第60回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2022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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------