

# プロペラ推進システムのための 風速とプロペラ角速度を用いた 推力制御器の設計



三重大学大学院工学研究科  
電気電子工学専攻

2022(令和4)年度修士論文

辻 裕介



# 目 次

<b>1</b>	<b>序論</b>	<b>2</b>
1.1	研究背景 . . . . .	2
1.2	本論文の構成 . . . . .	3
<b>2</b>	<b>モデリング</b>	<b>5</b>
2.1	プロペラ推力制御系の概要 . . . . .	5
2.2	プロペラ回転軸周りの動力学 . . . . .	6
<b>3</b>	<b>制御器設計</b>	<b>7</b>
3.1	プロペラ推力制御系 . . . . .	7
3.2	プロペラ角速度制御器 . . . . .	7
3.3	プロペラ推力制御器 . . . . .	8
3.3.1	比較手法 1 (comp.1) . . . . .	9
3.3.2	比較手法 2 (comp.2) . . . . .	9
3.3.3	提案手法 (prop.) . . . . .	9
<b>4</b>	<b>シミュレーション</b>	<b>10</b>
4.1	条件 . . . . .	10
4.2	$v_z - c_f$ 特性 . . . . .	10
4.3	推力制御 . . . . .	11
<b>5</b>	<b>実験</b>	<b>15</b>
5.1	条件 . . . . .	15
5.2	$v_z - c_f$ 特性 . . . . .	15
5.3	推力制御 . . . . .	16
<b>6</b>	<b>結論</b>	<b>19</b>
	参考文献	<b>20</b>

# 第 1 章

## 序論

---

### 1.1 研究背景

プロペラ推進システムの一つである電動垂直離着陸機 (eVTOL) の市場規模の拡大が著しい。特に無人 eVTOL は、空撮による調査、農薬散布、荷物の運搬などに用いられるが [1], プロペラ振動に伴う騒音がしばしば問題になる。一方で、eVTOL によるコンクリート構造物との接触を伴う非破壊検査などの対象物と接触する作業においては、安定性を維持しながら対象物との接触力を制御することが課題になる [2]。これらの問題を解決するには機体の推力を高精度制御する必要がある。そこで、プロペラ推進システムのための高精度なプロペラ推力制御を本研究の目的とする。

本稿では、1 枚 1 枚の翼に加わる揚力の軸方向成分の合力を推力と定義する。また、2 枚の動翼で構成されるプロペラをモータで回転させるシステムをプロペラ推進システムと呼ぶこととする。

プロペラ推力を制御する方法は、プロペラ角速度をフィードバックする手法とフィードバックしない手法に分類できる。フィードバックしない手法として、文献 [3] [4] [5] では、開ループプロペラ角速度制御によって間接的にプロペラ推力を制御している。推力はプロペラ角速度の 2 乗にほぼ比例するためである。しかしながらプロペラ角速度を開ループ制御した場合、プロペラ回転軸周りに加わる外乱トルクの影響に弱い。

プロペラ角速度をフィードバックする手法は、モータ電流をフィードバック制御する手法としない手法に分類できる。モータ電流をフィードバックしない手法を用いた文献 [6] [7] [8] では、電

圧制御による閉ループプロペラ角速度制御系を構築しており、間接的にプロペラ駆動トルクを制御している。しかしながら、この手法はモータの駆動回路のモデル化誤差に弱い。

モータ電流をフィードバックする手法は、推力係数を一定値としてモデル化する手法と、推力係数を可変とする手法に分類できる。推力係数を一定値としてモデル化する手法 [9] [10] は、対気速度変動時に、真の推力係数とのモデル化誤差により推力応答値が推力指令値に追従しない場合がある。

推力係数を可変とする手法は、対気速度を推力係数モデルの引数とする手法としない手法に分けられる。対気速度を推力係数モデルの引数としない手法として、文献 [11] では、地面との距離に応じて推力係数モデルを変化させる制御器を提案している。しかしながら、対気速度の変化による推力係数の変化に対応できない。文献 [12] では推力係数モデルを進行率の関数としているが、動作点によっては無視できないモデル化誤差が生じる。これにより推力指令値に対して応答値が追従しない問題が生じる。

対気速度を推力係数モデルの引数とする手法は、風向を計測しない手法とする手法に分けられる。風向を計測しない手法として、文献 [13] では、1次元風速計を用いており風向は計測していない。しかしながら、風向の変化による推力係数の変化に対応できない。

そこで本稿では、プロペラ推力制御器内で用いる推力係数モデルを対気速度とプロペラ角速度の関数とし風向を計測する手法を提案し、シミュレーションと実験にて有効性の検証をした。

## 1.2 本論文の構成

本論文の構成を以下に述べる。第2章では、プロペラ推力制御系をモデリングする。第3章では、プロペラ推力制御系のための制御器を設計する。第4章では、推力制御のシミュレーション結果を示す。第5章では、推力制御の実験結果を示す。最後に第6章で結論を述べる。

なお、本論文中的  $\widehat{\bigcirc}$  と  $\bigcirc_n$  はそれぞれ、推定値、ノミナル値を示す。

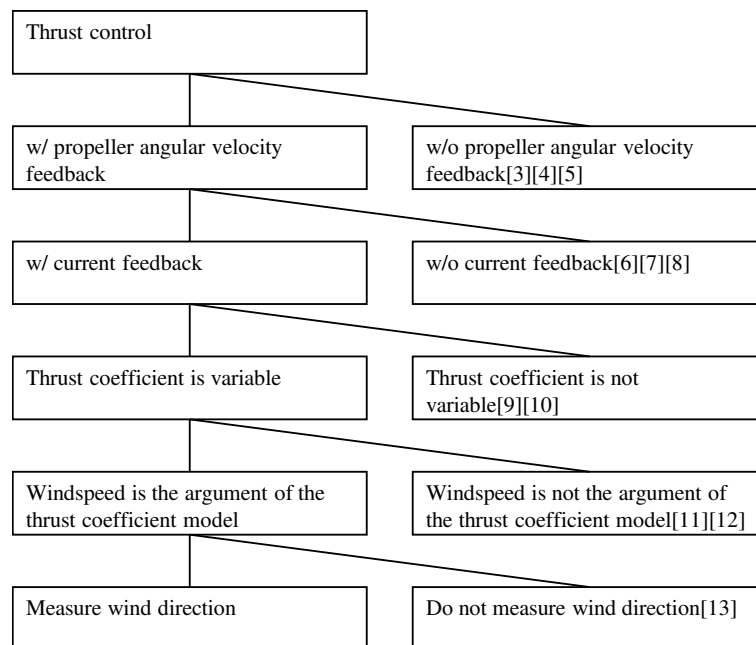


Fig. 1-1: Logic tree diagram

## 第 2 章

# モデリング

---

本節ではプロペラ、風向風速計、モータ、エンコーダ、力センサで構成されるプロペラ推力制御系をモデル化する。

### 2.1 プロペラ推力制御系の概要

Fig. 2-1 にプロペラ推力制御系の概略図を示す。Z 軸はモータ回転軸を基準とした。 $f, \omega, \tau, v_n, v_p, v, v_z, \alpha_n, \alpha$  はそれぞれ、推力、プロペラ角速度、反トルク、自然風の色度、プロペラ後流の色度、2次元風向風速計で計測した風速、 $v$  の Z 軸成分、Z 軸に対する  $v_n$  の向き、Z 軸に対する  $v$  の向きである。 $v_z = v \cos \alpha$  が成り立つ。2次元風向風速計は、プロペラ回転面から回転軸の正方向に向かって前方 50 mm の位置に設置した。 $f$  と  $\omega$  の関係を (2.1) 式でモデル化する。

$$f = c_f \omega^2 \quad (2.1)$$

ここで、 $c_f \equiv c_f(v_z, \omega)$  は推力係数であり、 $v_z$  と  $\omega$  の関数である。 $\tau$  と  $\omega$  の関係を (2.2) 式でモデル化する。

$$\tau = c_\tau \omega^2 \quad (2.2)$$

ここで、 $c_\tau$  は反トルク係数を意味する。対気速度（機体と空気との相対速度）とプロペラ角速度の比の関数である進行率  $a$  を (2.3) 式で定義する。

$$a := \frac{2\pi v_z}{\omega d} \quad (2.3)$$

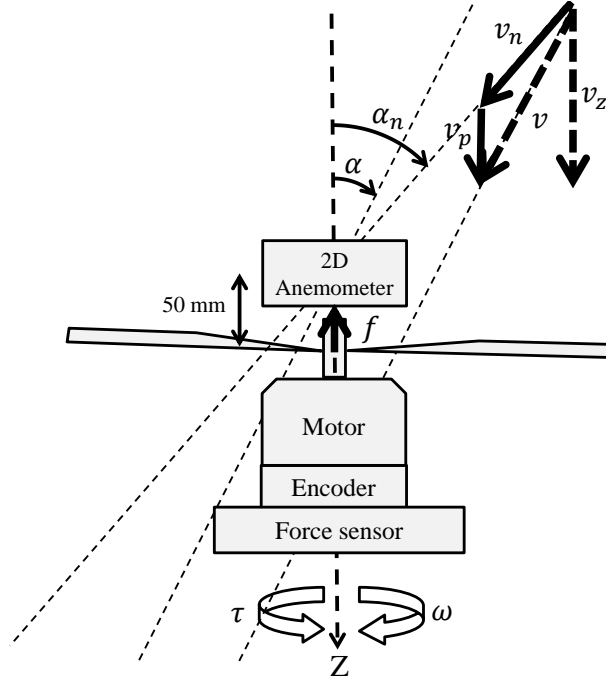


Fig. 2-1: Schematic of the propeller system

ここで、 $d$  はプロペラの直径である。

## 2.2 プロペラ回転軸周りの動力学

プロペラ回転軸周りの動力学を (2.4) 式でモデル化する。

$$j_m \dot{\omega} = k_t i_2^{ref} - \tau - \omega d_m \quad (2.4)$$

ここで、 $i_2^{ref}$ ,  $j_m$ ,  $k_t$ ,  $d_m$  はそれぞれ、モータ電流、プロペラの慣性モーメント、トルク係数、モータ回転軸周りの粘性係数である。また、 $i_2^{ref}$  とモータ電流参照値  $i^{ref}$  は次式を満たすものとする。

$$i_2^{ref} = \begin{cases} -i_{max} & (\text{if } i^{ref} < -i_{max}), \\ i^{ref} & (\text{if } -i_{max} \leq i^{ref} \leq i_{max}), \\ i_{max} & (\text{if } i^{ref} > i_{max}). \end{cases} \quad (2.5)$$

ここで、 $i_{max}$  はモータ電流の最大値を意味する。

## 第 3 章

# 制御器設計

---

本節では，プロペラ角速度制御器とプロペラ推力制御器を設計する。

### 3.1 プロペラ推力制御系

プロペラ推力制御系のブロック線図を Fig. 3-1 に示す。 $f^{ref}$ ,  $\omega_{sq}$ ,  $\omega^{ref}$ ,  $k_p$ ,  $\beta^{ref}$ ,  $\hat{\tau}_d$ ,  $\omega/s$ ,  $g_d$ ,  $g_\omega$ ,  $g_f$  はそれぞれ，推力指令，プロペラ角速度 2 乗指令，プロペラ角速度指令，比例ゲイン，プロペラ角加速度指令，プロペラ回転軸周りの推定外乱トルク，プロペラの回転角度，外乱オブザーバ [14]（以下，DOB）のカットオフ角周波数，疑似微分のカットオフ角周波数，ローパスフィルタのカットオフ周波数である。

### 3.2 プロペラ角速度制御器

DOB の外側には (3.1) 式のように閉ループ角速度制御器を組むことで目標値追従特性を調整している。

$$\beta^{ref} = k_p(\omega^{ref} - \hat{\omega}) \quad (3.1)$$

$\hat{\omega}$  は (3.2) 式で推定する。

$$\hat{\omega} = \frac{g_\omega s}{g_\omega + s} \frac{\omega}{s} \quad (3.2)$$



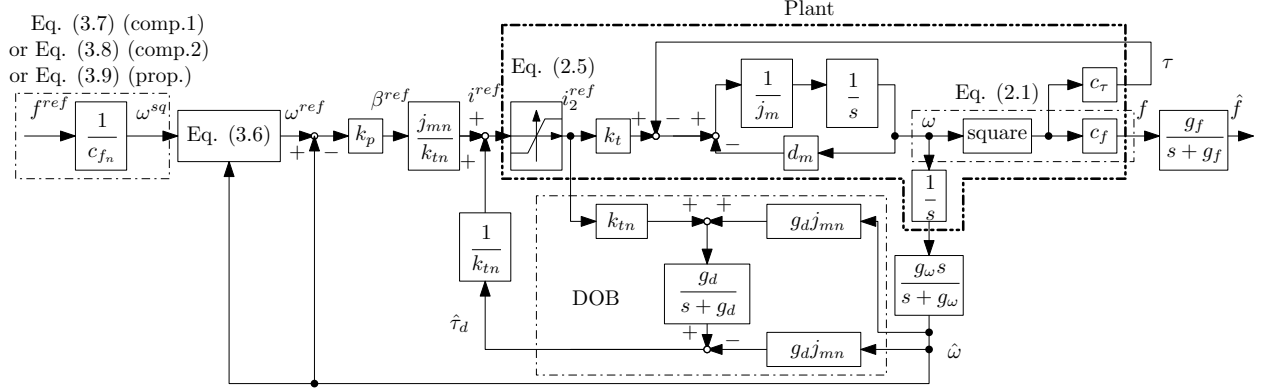


Fig. 3-1: Propeller thrust control system

$i^{ref}$  は, (3.3) 式で与える。

$$i^{ref} = \frac{j_{mn}}{k_{tn}} \beta^{ref} + \frac{1}{k_{tn}} \hat{\tau}_d \quad (3.3)$$

$\hat{\tau}_d$  は, (3.4) 式で表現される DOB を用いて推定する。

$$\hat{\tau}_d = (k_{tn} i_2^{ref} + g_d j_{mn} \hat{\omega}) \frac{g_d}{s + g_d} - g_d j_{mn} \hat{\omega} \quad (3.4)$$

電流飽和が生じず, DOB が理想的に働くとき, (2.4) 式と (3.3) 式から (3.5) 式が成り立つ。

$$\beta^{ref} = \dot{\omega} \quad (3.5)$$

### 3.3 プロペラ推力制御器

$f^{ref} \geq 0$  を前提とする。

$\omega^{ref}$  は (3.6) 式で導出する。

$$\omega^{ref} = \begin{cases} \sqrt{\omega^{sq}} & (\hat{\omega} < \omega_s) \\ \omega^{sq}/\hat{\omega} & (\omega_s \leq \hat{\omega}) \end{cases} \quad (3.6)$$

$\omega_s$  は,  $\omega^{ref}$  の正の閾値であり十分小さな値である。

### 3.3.1 比較手法 1 (comp.1)

文献 [9] で紹介されている比較手法 1 では  $\omega_{sq}$  を (3.7) 式で生成している。

$$\omega_{sq} = \frac{f^{ref}}{c_{fn}(v_{zn}, \omega_n)} \quad (3.7)$$

### 3.3.2 比較手法 2 (comp.2)

$\omega_{sq}$  を (3.8) 式で生成する手法を比較手法 2 とする。

$$\omega_{sq} = \frac{f^{ref}}{c_{fn}\left(\frac{a|_{\omega=\omega_n}\omega_n^d}{2\pi}, \omega_n\right)} \quad (3.8)$$

上式は  $c_{fn}$  を  $a|_{\omega=\omega_n}$  の関数とすることを意味する。文献 [12] においても  $c_{fn}$  を  $a$  の関数としている。

### 3.3.3 提案手法 (prop.)

$\omega_{sq}$  を (3.9) 式のように生成する。

$$\omega_{sq} = \frac{f^{ref}}{c_{fn}(v_z, \omega)} \quad (3.9)$$

$v_z$  と  $\omega$  を引数として  $c_{fn}$  を変化させる。

**Remark 1** (3.6) 式のフィードバック線形化を用いて  $f^{ref}$  に対する  $f$  の立ち上がり時間を短くする。ただし、 $\omega \simeq 0$  rad/s 時は  $\omega^{ref}$  が発散する可能性があるため、平方根を用いる。

$\omega = \hat{\omega}$  と  $c_f = c_{fn}$  を仮定すると、(3.6) 式を用いることで  $f^{ref}$  から  $f$  までの閉ループ伝達関数  $G_f$  は (3.10) 式で近似できる [10]。

$$G_f = \frac{2k_p}{s + 2k_p} \quad (3.10)$$

## 第 4 章

# シミュレーション

---

本節では比較手法 1，比較手法 2，提案手法の推力制御性能をシミュレーションにより検証する。

### 4.1 条件

$k_t = k_{tn}$ ,  $j_m = j_{mn}$ ,  $d_m = 1.5 \times 10^{-6}$  Nm/s,  $c_\tau = 2.0 \times 10^{-7}$  Nm/(rad/s<sup>2</sup>) を仮定した。 $v_z$  は、実験値を模擬している。

### 4.2 $v_z - c_f$ 特性

$c_f = c_{fn}$  と仮定する。実験的に同定した Fig. 5-2 の結果を用いる。 $\omega=i$  ( $i=100, \dots, 700$ ) の時の計測点群の内、 $v_z$  が最大値を取る点を  $v_i^{max}$ ,  $v_z$  が最小値を取る点を  $v_i^{min}$  と定義した。また、その時の  $c_{fn}$  を  $c_i^{max}$  あるいは  $c_i^{min}$  と定義した。計測点群の内側の領域では、近傍の計測値を用いて線形補間した値を  $c_{fn}$  とした。それ以外の領域（計測点群の外側の領域）では、 $c_i^{min}$  あるいは  $c_i^{max}$  ( $i=100, \dots, 700$ ) を  $c_{fn}$  として用いた。提案手法では  $v_z$  と  $\hat{\omega}$  を参照して  $c_{fn}$  を決める。一方で、比較手法 2 では  $v_z$  と  $\omega_n$  を参照して  $c_{fn}$  を決める。比較手法 1 では  $v_{zn}$  と  $\omega_n$  を参照して  $c_{fn}$  を決める。

Table 4.1: Physical parameters

Nominal value of $k_t$	$k_{tn}$	$2.76 \times 10^{-2}$ Nm/A
Nominal value of $j_m$	$j_{mn}$	$5.29 \times 10^{-5}$ kgm <sup>2</sup>
Propeller diameter	$d$	$2.5 \times 10^{-1}$ m

Table 4.2: Design parameters

Control period	$t_c$	$5.0 \times 10^{-1}$ ms
Cutoff frequency of $\omega$	$g_\omega$	600 rad/s
Cutoff frequency of DOB	$g_d$	600 rad/s
Cutoff frequency of $f$	$g_f$	100 rad/s
Proportional gain	$k_p$	$18 \text{ s}^{-1}$
Maximum motor current	$i_{max}$	10 A
Threshold of $\omega^{ref}$	$\omega_s$	2 rad/s
Nominal value of $\omega$ (comp.1, comp.2)	$\omega_n$	500 rad/s
Nominal value of $v_z$ (comp.1)	$v_{zn}$	4.57 m/s

### 4.3 推力制御

シミュレーションに用いたパラメータを Tables 4.1–4.2 に示す。動作条件は、Table 4.3 に示す。

シミュレーション結果を Figs. 4-1–4-4 に示す。Figs. 4-1–4-4 (a) の太線，太点線，細線，細点線はそれぞれ， $f^{ref}$ ，比較手法 1，比較手法 2，提案手法を用いた時の  $\hat{f}$  である。(b) の太点線，細線，細点線はそれぞれ，比較手法 1，比較手法 2，提案手法を用いた時の  $v_z$  である。(c) の太線，太点線，細線，点線はそれぞれ，提案手法の  $\omega^{ref}$ ，比較手法 1，比較手法 2，提案手法を用いた時の  $\hat{\omega}$  である。

Figs. 4-1–4-4 (a) によると，比較手法 1 と比較手法 2 に比べ提案手法は  $f^{ref}$  に対する  $\hat{f}$  の追従

Table 4.3: Operating conditions

	0 - 5 s			5 - 7 s		
	$f^{ref}$ [N]	$\alpha_n$ [deg]	$v_n$ [m/s]	$f^{ref}$ [N]	$\alpha_n$ [deg]	$v_n$ [m/s]
Condition 1	0	0	2	7	0	2
Condition 2	0	90	2	7	90	2
Condition 3	0	180	2	7	180	2
Condition 4	0	0	2	1	0	2

性が高い。5.0 s以降で比較手法1と比較手法2は定常誤差が生じている。これは、 $c_{fn} \neq c_f$  となるためである。

Figs. 4-1-4-3 (b) の5.0 s以降で $v_z$ が増加するのはプロペラが回転することにより、プロペラ後流 $v_p$ が発生するためである。

Figs. 4-1-4-4 (c) にて、提案手法の $\omega^{ref}$ が5.0 s以降にオーバーシュートする原因は、(3.6) 式にある。ただ、電流飽和が原因で、 $\omega^{ref}$ に対する $\hat{\omega}$ の追従性はよくない。一方で、定常状態では $\omega^{ref}$ に対して $\hat{\omega}$ はおおむね追従する。比較手法1，比較手法2，提案手法で定常値が異なる原因は用いられる $\omega^{ref}$ が異なるためである。Fig. 4-1 (c) の6.3 s，Fig. 4-2 (c) の5.3 s付近で $\hat{\omega}$ が振動する原因は、Fig. 5-2 で $v_z$ と $\omega$ から推定される $c_f$ の変化に起因する。

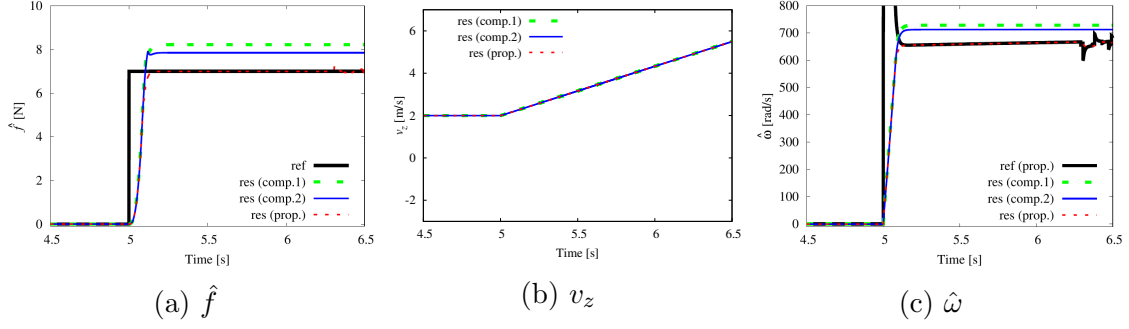


Fig. 4-1: Simulation results under the condition 1 ( $f^{ref} = 7$  N,  $\alpha_n = 0$  deg,  $v_n = 2.0$  m/s)

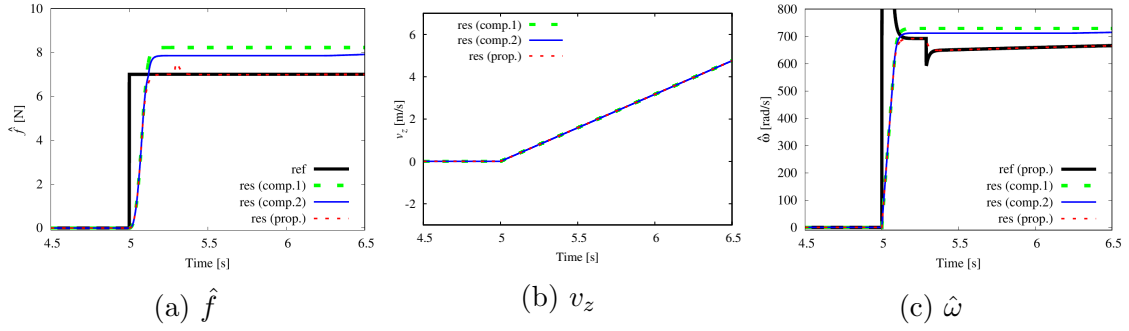


Fig. 4-2: Simulation results under the condition 2 ( $f^{ref} = 7$  N,  $\alpha_n = 90$  deg,  $v_n = 2.0$  m/s)

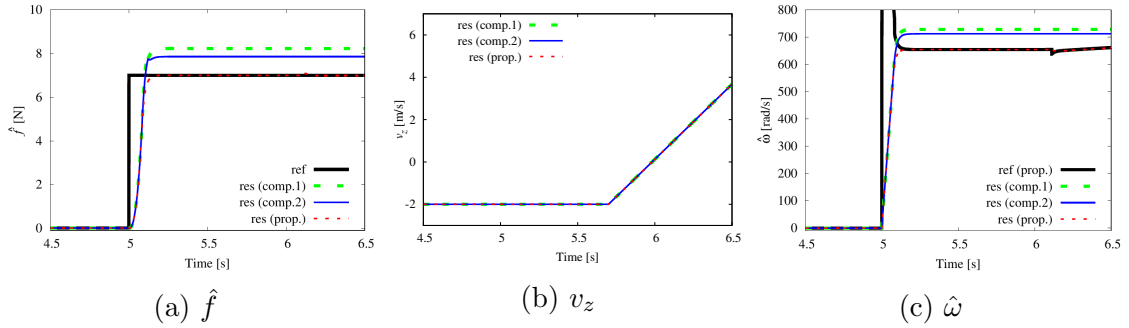


Fig. 4-3: Simulation results under the condition 3 ( $f^{ref} = 7$  N,  $\alpha_n = 180$  deg,  $v_n = 2.0$  m/s)

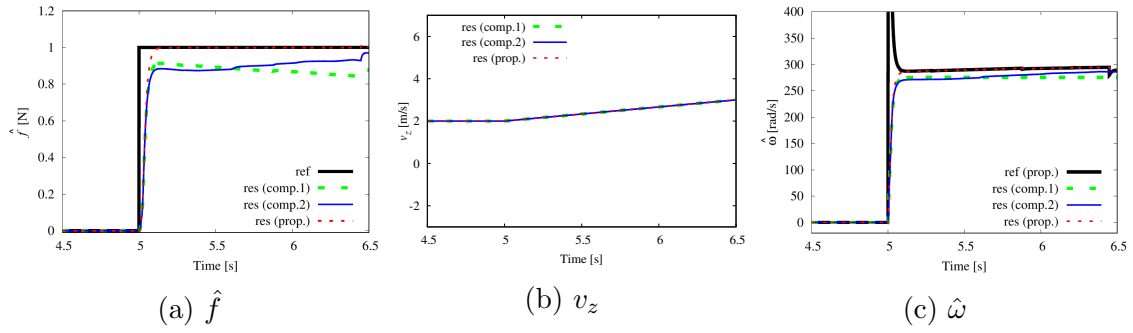


Fig. 4-4: Simulation results under the condition 4 ( $f^{ref} = 1$  N,  $\alpha_n = 0$  deg,  $v_n = 2.0$  m/s)

## 第 5 章

# 実験

---

本節では，推力制御の実験結果を示し，シミュレーション結果との整合性を検証する。

### 5.1 条件

実験装置を Fig. 5-1 に示す。ブラシレス DC モータ (Maxon Motor, EC 4pole) で回転させたプロペラ (APC, LP 10038SF 10X3.8SF Slo) に，羽根無し扇風機 (Dyson, GF6-JP-MEA1037A) を円筒で覆ったもの (以下，風洞) で風を当てた。 $f$  の計測には 6 軸力センサ (Leptolino Inc.) を用いた。 $v$  と  $\alpha$  の計測は二次元超音波風向風速計 (Field Pro Inc., FT742) を用いた。モータは 6 軸力センサを介して地面に置かれた重量の機械構造用炭素鋼のブロックに固定されている。

### 5.2 $v_z - c_f$ 特性

Fig. 3-1 の推力制御系において， $\omega$  を一定値， $\alpha_n = 0 \text{ deg}$ ，とし， $v_n$  を変化させた際の  $c_f$  の変化を記録した。 $v_z - c_{fn}$  特性を Fig. 5-2 に示す。プロペラ推力制御器内の  $c_{fn}$  は Fig. 5-2 の結果に基づき第 4.2 項と同じ要領で設計する。



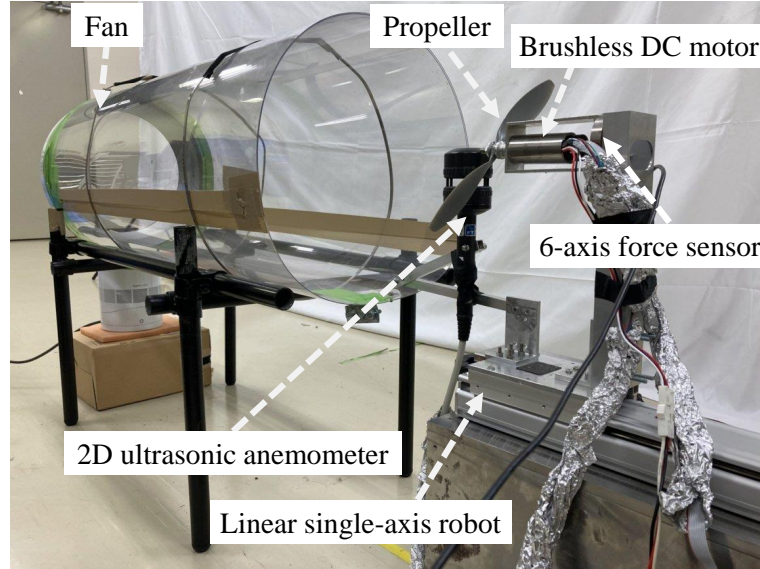


Fig. 5-1: Experimental system

### 5.3 推力制御

推力制御の実験結果を示す。シミュレーションと同様，Tables 4.1–4.2のパラメータ，及び Table 4.3の動作条件を用いた実験結果を Figs. 5-3–5-6 に示す。Figs. 5-3–5-6 (a)の太線，太点線，細線，細点線はそれぞれ， $f^{ref}$ ，比較手法1，比較手法2，提案手法を用いた時の $\hat{f}$ である。(b)の太点線，細線，細点線はそれぞれ，比較手法1，比較手法2，提案手法を用いた時の $v_z$ である。(c)の太線，太点線，細線，点線はそれぞれ，提案手法の $\omega^{ref}$ ，比較手法1，比較手法2，提案手法を用いた時の $\hat{\omega}$ である。

Figs. 5-3–5-6 (a)を見ると， $\hat{f}$ は振動的である。これは， $\hat{\omega}$ の振動が主因だと考えられる。Figs. 5-3–5-6 (b)の5.0 s以降で手法によって $v_z$ が異なるのは， $\omega^{ref}$ の時間応答が手法によって異なる結果， $v_p$ に違いが生じるためだと考えられる。

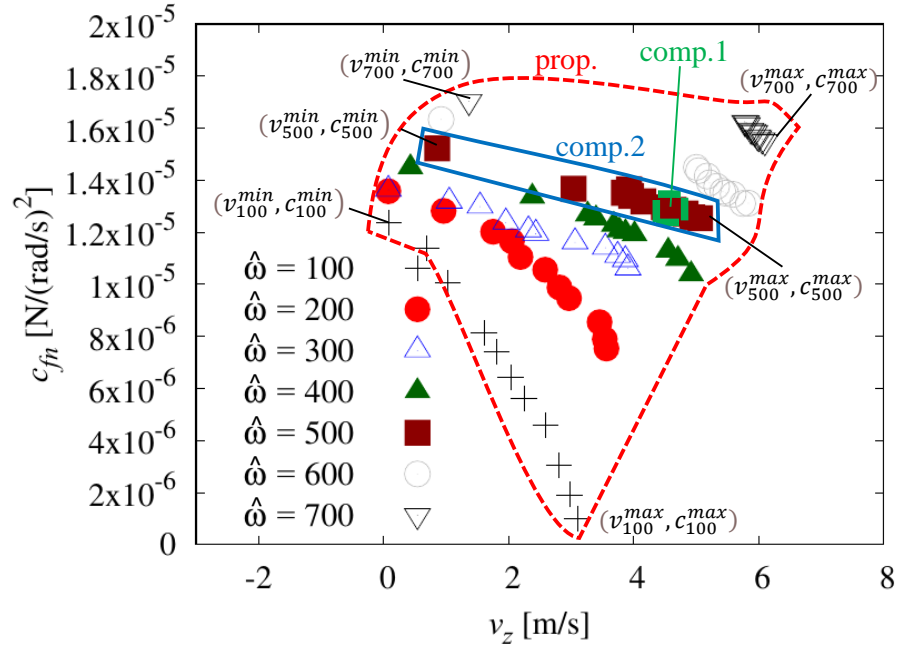


Fig. 5-2:  $v_z - c_{fn}$  characteristics

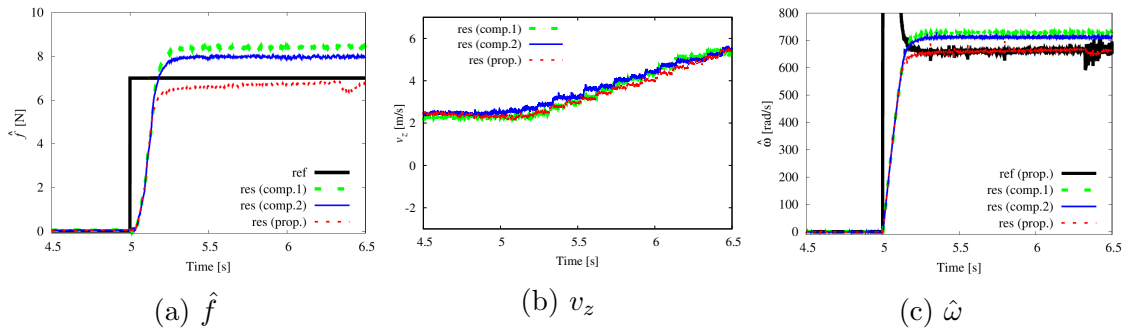


Fig. 5-3: Experimental results under the condition 1 ( $f^{ref} = 7$  N,  $\alpha_n = 0$  deg,  $v_n = 2.0$  m/s)

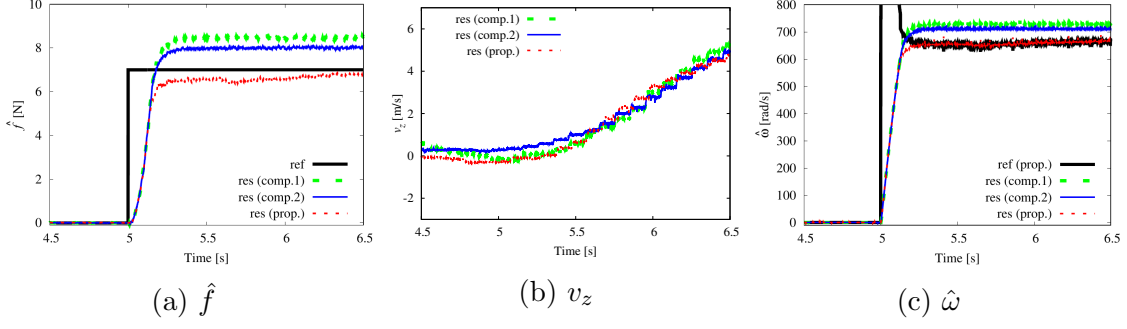


Fig. 5-4: Experimental results under the condition 2 ( $f^{ref} = 7$  N,  $\alpha_n = 90$  deg,  $v_n = 2.0$  m/s)

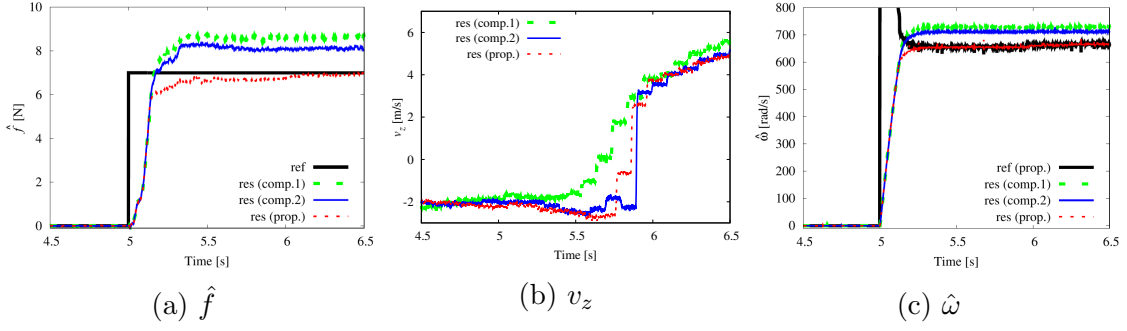


Fig. 5-5: Experimental results under the condition 3 ( $f^{ref} = 7$  N,  $\alpha_n = 180$  deg,  $v_n = 2.0$  m/s)

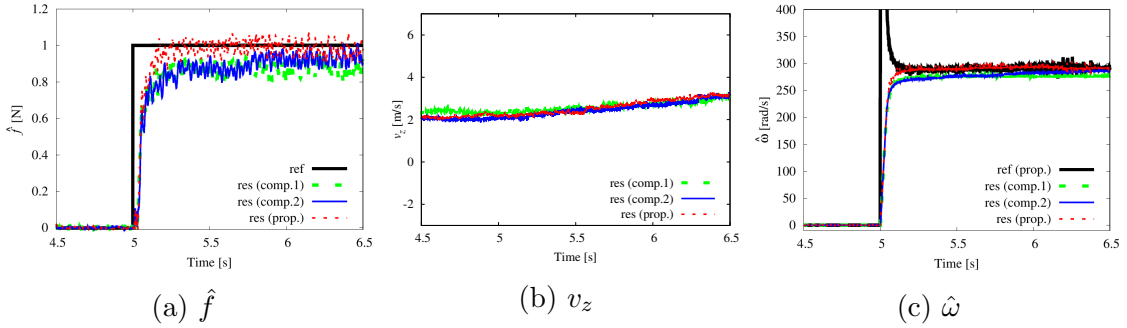


Fig. 5-6: Experimental results under the condition 4 ( $f^{ref} = 1$  N,  $\alpha_n = 0$  deg,  $v_n = 2.0$  m/s)

## 第 6 章

### 結論

---

モータ駆動かつ 2 枚の動翼で構成されるプロペラ推進システムの推力を制御するための制御器を設計した。制御器内の推力係数モデルを対気速度とプロペラ角速度の関数とする点に特徴がある。対気速度やプロペラ角速度が変化した際に、制御器内の推力係数を固定にする手法や推力係数を進行率の関数にする手法と比べ定常偏差が小さいことをシミュレーションと実験により確認した。今後の課題として、角速度指令の急激な変化や角速度指令の振動が見られるため、安定性の確認が必要である。また、定常偏差の改善のためには推力係数と風速の特性を高精度にモデル化し制御する必要がある。手段として、非線形制御理論の活用や、推力のフィードフォワード制御と推力推定値を用いたフィードバック制御の併用が考えられる。

## 参考文献

- [1] Hazim Shakhatreh, Ahmad H. Sawalmeh, Ala Al-Fuqaha, Zuochao Dou, Eyad Almaita, Issa Khalil, Noor Shamsiah Othman, Abdallah Khreishah, and Mohsen Guizani, “Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges”, *IEEE Access*, Vol. 7, pp. 48572–48634, 2019.
- [2] Karen Bodie, Maximilian Brunner, Michael Pantic, Stefan Walser, Patrick Pfändler, Ueli Angst, Roland Siegwart, and Juan Nieto, “Active Interaction Force Control for Contact-Based Inspection With a Fully Actuated Aerial Vehicle”, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 37, No. 3, pp. 709–722, 2021.
- [3] Masanori Fujita and Akira Shimada, “Takeoff and landing control using force sensor by electrically-powered helicopters”, *IEEJ Transactions on Industry Applications*, Vol. 127, No. 2, pp. 112–117, 2007.
- [4] Mostafa Mohammadi and Alireza Mohammad Shahri, “Adaptive Nonlinear Stabilization Control for a Quadrotor UAV: Theory, Simulation and Experimentation”, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 72, No. 1, pp. 105–122, 2013.
- [5] Sangyul Park, Jeongseob Lee, Joonmo Ahn, Myungsin Kim, Jongbeom Her, Gi-Hun Yang, and Dongjun Lee, “ODAR: Aerial Manipulation Platform Enabling Omnidirectional Wrench Generation”, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 23, No. 4, pp. 1907–1918, 2018.
- [6] Antonio Franchi and Anthony Mallet, “Adaptive closed-loop speed control of BLDC motors

- with applications to multi-rotor aerial vehicles”, In Proc. of *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2017.
- [7] X. Lyu, J. Zhou, H. Gu, Z. Li, S. Shen, and F. Zhang, “Disturbance Observer Based Hovering Control of Quadrotor Tail-Sitter VTOL UAVs Using  $H_\infty$  Synthesis”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 3, No. 4, pp. 2910–2917, 2018.
- [8] W. Xu, H. Gu, Y. Qing, J. Lin, and F. Zhang, “Full Attitude Control of an Efficient Quadrotor Tail-sitter VTOL UAV with Flexible Modes”, In Proc. of *2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pp. 542–550, 2019.
- [9] Y. Hayashi, D. Yashiro, K. Yubai, and S. Komada, “Contact Force Control of Quadrotor using Rotor Angular Velocity”, *IEEJ Transactions on Industry Applications*, Vol. 140, No. 9, pp. 662–672, 2020.
- [10] Yuki Nishii, Daisuke Yashiro, Kazuhiro Yubai, and Satoshi Komada, “Design of a contact-force controller including airframe’s velocity and acceleration feedback controllers for one-degree-of-freedom propeller-driven systems”, *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 215, No. 2, p. e23379, 2022.
- [11] Sota Yamagiwa, Daisuke Yashiro, Kazuhiro Yubai, and Satoshi Komada, “Bilateral Control of Propeller-Driven System influenced by Ground Effect”, *IEEJ Transactions on Industry Applications*, Vol. 138, No. 7, pp. 574–581, 2018.
- [12] Kentaro Yokota and Hiroshi Fujimoto, “Pitch Angle Control by Regenerative Air Brake for Electric Aircraft”, *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol. 11, No. 2, pp. 308–316, 2022.
- [13] Yuki Kato, Daisuke Yashiro, Kazuhiro Yubai, and Satoshi Komada, “Performance Evaluation of a Gain-scheduled Propeller Thrust Controller Using Wind Velocity and Rotor Angular Velocity Under Fluctuating Wind”, In Proc. of *IEEE 17th International Conference on Advanced Motion Control*, 2022.

- [14] K. Ohnishi, M. Shibata, and T. Murakami, “Motion control for advanced mechatronics”, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 1, No. 1, pp. 56–67, March 1996.

# 謝辞

本研究の遂行にあたり、矢代大祐助教には日ごろからの適切なご指導、ご助言に加え、研究予算や研究環境の用意をしていただきました。心から御礼申し上げます。駒田諭教授、弓場井一裕教授、山村直紀准教授、小山昌人助教には全体検討会等で多くの助言をいただきました。深く感謝いたします。プロペラ推進システムに関する研究の先輩である林佑樹先輩、西井勇輝先輩、犬飼将也先輩、加藤勇樹先輩には非常に親切ご指導をいただき、研究を円滑に進めることができました。深く感謝いたします。同じ班の後輩である磯部文哉君、粟井幹君、伴藤信一郎君、永澤慎太郎君は私の不十分な指導でも自主的にそれぞれの研究を遂行し、私の研究にも様々な意見をくれ、大変助かりました。日々のグループ検討会などで近藤大智先輩、長岡佑馬先輩、新崎拓海君、池田遊斗君、高井寛人君、野場匡太郎君、坂井陸人君には他班ながらも様々な助言をいただきました。大変感謝いたします。また、電機システム研究室、制御システム研究室、エネルギーシステム研究室内の皆様にも、全体検討会等で多くの知識をいただき、非常に助かりました。高橋翼君には3年間同じ研究室の同期として、さまざまな議論を重ね、互いに学び、高め合った仲間でした。大学院の2年間同期であった魚谷尚志君と、学部の1年間同期であった山口英也君、松野将弥君にもお世話になりました。彼らとの助け合いによって研究を遂行することができました。本当にありがとうございました。また、長岡科学技術大学の横倉勇希准教授には実験用フレームワークのARCSを提供していただきました。感謝申し上げます。最後に、私の学生生活を様々な面から支えていただいた両親に心から感謝いたします。

令和5年3月24日



# 研究業績

## 国内学会発表論文

- [1] 辻裕介, 矢代大祐, 弓場井一裕, 駒田諭

“クアッドティルトロータ機の接触力制御,” 機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会演論文集, 1P3-B05, Online, Jun. 6th–8th, 2021.

- [2] 辻裕介, 矢代大祐, 弓場井一裕, 駒田諭

“クアッドティルトロータ機の水平方向への接触力制御,” 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会講演論文集, Online, Sep. 7th–8th, 2021.

- [3] 辻裕介, 矢代大祐, 弓場井一裕, 駒田諭

“風速とプロペラ角速度を用いたゲインスケジュールド軸流羽根車推力制御器の変動風向下での性能検証,” 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会講演論文集, Online, Aug. 29th–30th, 2022.

- [4] 辻裕介, 矢代大祐, 弓場井一裕, 駒田諭

“軸流羽根車のための流速とプロペラ角速度を用いたゲインスケジュールド推力制御器の変動風向下での性能検証,” 第65回自動制御連合講演会論文集, 宇都宮, Nov. 12th–13th, 2022.

- [5] 辻裕介, 矢代大祐, 弓場井一裕, 駒田諭

“軸流羽根車のための風速とプロペラ角速度を用いたゲインスケジュールド推力制御器の風向反転時における性能検証,” 電気学会メカトロニクス制御研究会, 東京, Dec. 3th, 2022.

- [6] 辻裕介, 矢代大祐, 弓場井一裕, 駒田諭

“プロペラ駆動系のための風速とプロペラ角速度を用いた推力制御器の設計,” 電気学会東海支部環境調和型新世代パワーエレクトロニクス技術若手セミナー計測自動制御学会中部支部電機計測制御技術ワーキングセミナー合同大学院生発表会, Online, Dec. 6th, 2022.

- [7] 辻裕介, 矢代大祐, 弓場井一裕, 駒田諭

“プロペラ推進システムのための風速とプロペラ角速度を用いた推力制御器の推力変動下における性能検証,” 電気学会知覚情報/次世代産業システム合同研究会, Online, Mar. 27th, 2023.

- [8] 辻裕介, 矢代大祐, 弓場井一裕, 駒田諭

“プロペラ推進システムのための風速とプロペラ角速度とプロペラ後流を用いた推力制御器の設計,” 計測自動制御学会第50回知能システムシンポジウム, Online, Mar. 28-29th, 2023.

## 国際学会発表論文

- [9] Yusuke Tsuji, Daisuke Yashiro, Kazuhiro Yubai, Satoshi Komada, “Thrust Control with Tilt Angular Velocity for Quad Tilt Rotors in 2-dimensional space,” Proceedings of the International Symposium on Engineering 2022 (Research Area: A), Tsu, Japan, Dec. 2th, 2021.

- [10] Yusuke Tsuji, Daisuke Yashiro, Kazuhiro Yubai, Satoshi Komada, “Performance Evaluation of Gain-scheduled Thrust Controller Using Wind Velocity and Propeller Angular Velocity for Propeller Driven Systems Under Variable Wind Speed,” Proceedings of the International Symposium on Engineering 2022 (Research Area: A), Tsu, Japan, Dec. 1st, 2022.

- [11] Yusuke Tsuji, Daisuke Yashiro, Kazuhiro Yubai, Satoshi Komada, “Performance Evaluation of a Gain-scheduled Thrust Controller Using Flow Velocity Under Omni-directional Wind Direction,” Proceedings of the 8th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization, China, Mar. 24th–26th, 2023.