

安定飛行を目的としたドローンの飛行制御

19sc055 杉村 照瞭 19sc057 鈴木 快步

指導教員：坂本登

1 はじめに

近年ドローンの技術は著しく発展してきており、農業や輸送物流、空撮など数多くの分野で活用されている。ドローンには、安定した飛行制御が必要不可欠である。安定した飛行ができなければ家屋、電線、樹木などの接触事故が発生し、ドローンが墜落し人々を危険にさらす恐れがある。

そのため、本研究では自作したドローンの安定飛行を目的とした研究を行う。

現在研究室で使用している実機ドローンは重心の位置を特定できていないため、質点を機体上に追加することで重心のずれを再現し、角度、高度、水平方向の移動距離について言及した。

2 質点を加えない状態でのシミュレーション設計

2.1 ドローンのパラメータ

研究室で使用している実機ドローンでは重心の位置が特定できていないため、質点を機体上に追加することで重心のずれを再現する。質点を加えていない状態と質点を加えた状態でのドローン制御を行う。2章では質点を加えていない状態でのドローンの制御を行う。このときドローンシステムの質量を m_b 、慣性モーメントを J_{xx} 、中心からモータまでの長さを l_y 、各ロータの推力を $f_i (i = 1, 2, 3, 4)$ とする。回転角度は ϕ 、 z 軸方向の高度を z 、 y 軸方向の移動距離を y と表記して出力結果とする。この時のドローンの状態を図 1、今回使用するパラメータの値を表 1 に示す。

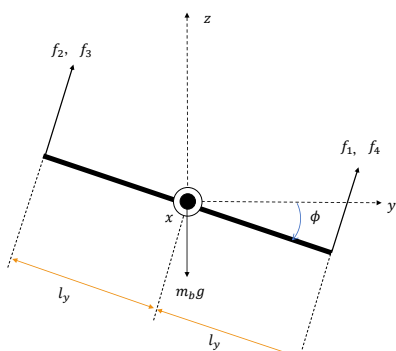


図 1 質点を加えないドローンのシステム

表 1 ドローンのシミュレーションにおけるパラメータ

記号	数値 [単位]
m_b	1.20[kg]
J_{xx}	7.309×10^{-3} [kgm ²]
l_y	0.17[m]

2.2 運動方程式の導出

時計周りを正として x 軸周りのモーメントについて考えると、図 1 の状態でのドローンの回転運動の運動方程式は以下ようになる。

$$J_{xx}\ddot{\phi} = -(f_1 + f_4)l_y + (f_2 + f_3)l_y$$

$$F = -f_1 + f_2 + f_3 - f_4 \text{ とすると,}$$

$$\ddot{\phi} = \frac{Fl_y}{J_{xx}} \quad (2.1)$$

ドローンが上昇する高度 z についての式は、

$$m_b\ddot{z} = (f_1 + f_2 + f_3 + f_4) \cos \phi - m_b g$$

$$u = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 \text{ とすると,}$$

$$\ddot{z} = \frac{u \cos \phi - m_b g}{m_b} \quad (2.2)$$

移動距離 y についての式は、

$$m_b\ddot{y} = (f_1 + f_2 + f_3 + f_4) \sin \phi$$

$$\ddot{y} = \frac{u \sin \phi}{m_b} \quad (2.3)$$

式 (2.1), (2.2), (2.3) より状態方程式は、

$$x = \begin{bmatrix} \phi \\ \dot{\phi} \\ z \\ \dot{z} \\ y \\ \dot{y} \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{Fl_y}{J_{xx}} \\ 0 \\ \frac{u \cos \phi - m_b g}{m_b} \\ 0 \\ \frac{u \sin \phi}{m_b} \end{bmatrix} \text{ とすると,}$$

$$\dot{x} = Ax + B \quad (2.4)$$

となる。

ここで角度目標値のPID制御により発生させたトルク τ_x は以下ようになる. [1]

$$\tau_x = L_x \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix}, \quad L_x = \begin{bmatrix} -l_y & l_y & l_y & -l_y \end{bmatrix}$$

また各ロータの推力を求めるために τ_x に関するモーメントからの変換は以下のように行う.

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix} = L_x^T (L_x L_x^T)^{-1} \tau_x$$

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/4l_y \\ 1/4l_y \\ 1/4l_y \\ -1/4l_y \end{bmatrix} \tau_x \quad (2.5)$$

高度目標値のPID制御により生じる推力の総和 U_f は以下ようになる. [2]

$$U_f = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix}$$

また, 推力への分配を行う変換は下のように行う.

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/4 \\ 1/4 \\ 1/4 \\ 1/4 \end{bmatrix} U_f \quad (2.6)$$

2.3 シミュレーション設計と出力結果

(2.4)の状態方程式をもとに設計したシミュレーションのブロック線図を図2に示す. また姿勢角の目標値 ϕ_{ref} , 高度の目標値 z_{ref} から推力に変換する場合にはそれぞれ式(2.5),(2.6)を用いて行った.

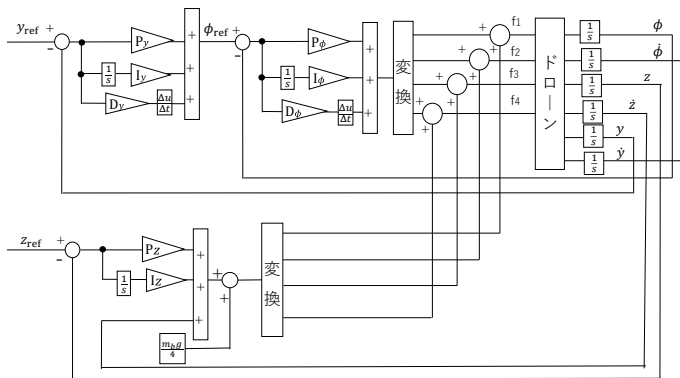


図2 質点を加えないときのブロック線図

今回のブロック線図では, カスケード制御を用いることで姿勢角変化によって慣性力が発生しないように対策を行った. PID制御で使用するそれぞれのゲイン値を表2に示す.

記号	名称	値
P_ϕ	角度制御の比例ゲイン	5
I_ϕ	角度制御の積分ゲイン	5
D_ϕ	角度制御の微分ゲイン	5
P_z	高度制御の比例ゲイン	0.6
I_z	高度制御の積分ゲイン	0.01
P_y	y 軸方向移動制御の比例ゲイン	1
I_y	y 軸方向移動制御の積分ゲイン	0
D_y	y 軸方向移動制御の微分ゲイン	0.5

姿勢角 ϕ , 高度 z , 移動距離 y の出力結果をそれぞれ図3, 4, 5に示す.

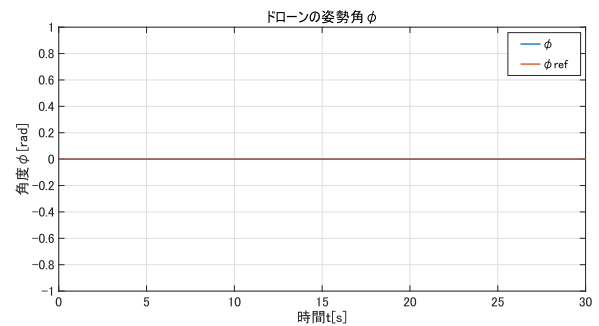


図3 姿勢角の出力結果

姿勢角目標値 ϕ_{ref} と姿勢角 ϕ より, 質点を加えていない状態では姿勢角は変化しないことがわかる.

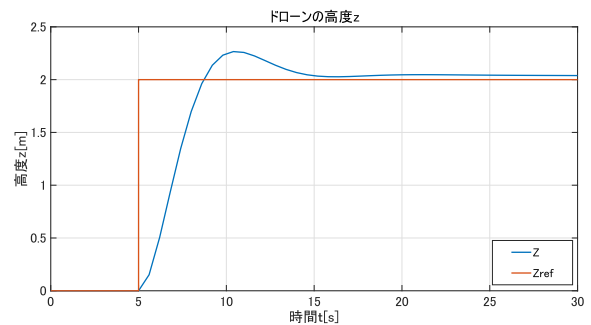


図4 高度の出力結果

初期の重力を打ち消すために加えた $\frac{mg}{4}$ によって落下させずに飛行させることができたが, 高度 z が高度目標値 z_{ref} を上回ってしまいオーバーシュートや定常偏差をなくすることができなかった. また, ゲイン値を変化させることで定常偏差をなくすることはできたが, オーバーシュートが大きくなってしまいあまり良い結果を得ることができなかった.

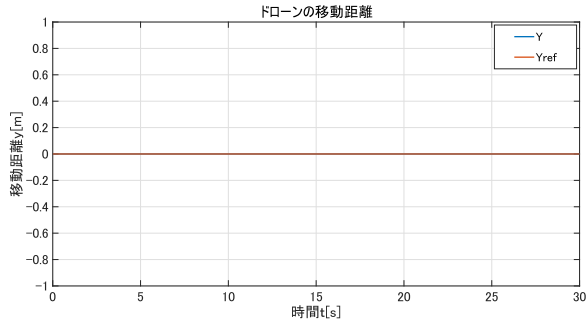


図5 移動距離の出力結果

姿勢角 ϕ が変化しないため、移動距離 y も同様に変化しないことがわかった。

3 質点を加えた状態でのシミュレーション設計

3.1 ドローンのパラメータ

研究室で使用している実機ドローンでは重心の位置が特定できていないため、質点を機体上に追加することで重心のずれを再現する。質点を加えていない状態と質点を加えた状態でのドローン制御を行う。3章では質点を加えた状態でのドローンの制御を行う。このときの質点を m_a 、ドローンシステムの質量を m_b 、慣性モーメントを J 、中心からモータまでの長さを l_y 、中心から重心までの距離を d_y 、各ロータの推力を $f_i (i = 1, 2, 3, 4)$ としてドローンの状態を図6に示す。また今回使用するパラメータの実際の値を表3に示す。

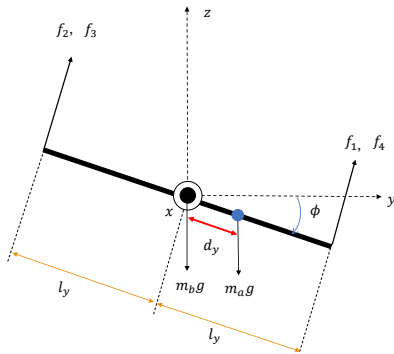


図6 質点を加えたドローンのシステム

表3 ドローンのシミュレーションにおけるパラメータ

記号	数値 [単位]
m_a	0,50[kg]
m_b	1.20[kg]
J	8.1×10^{-3} [kgm ²]
l_y	0.17[m]
d_y	0.04[m]

3.2 運動方程式の導出

今回のモデルの重心が x 軸から離れた状態となっているため、 m_a によって発生する慣性モーメントを J_a とすると求める慣性モーメント J は以下ようになる。

$$J_a = m_a d_y^2 \text{となるので,}$$

$$J = J_{xx} + J_a \quad (3.1)$$

式(3.1)より時計周りを正として x 軸周りのモーメントについて考えると、図6の状態でのドローンの回転運動の運動方程式は以下ようになる。

$$\begin{aligned} J\ddot{\phi} &= -(f_1 + f_4)l_y + (f_2 + f_3)l_y + m_a g \cdot d_y \cos \phi \\ &= \frac{Fl_y + m_a g d_y \cos \phi}{J} \end{aligned} \quad (3.2)$$

ドローンが上昇する高度 z についての式は、

$$(m_a + m_b)\ddot{z} = (f_1 + f_2 + f_3 + f_4) \cos \phi - (m_a + m_b)g$$

$$M = m_a + m_b \text{とすると,}$$

$$\ddot{z} = \frac{u \cos \phi - Mg}{M} \quad (3.3)$$

移動距離 y についての式は、

$$(m_a + m_b)\ddot{y} = (f_1 + f_2 + f_3 + f_4) \sin \phi$$

$$\ddot{y} = \frac{u \sin \phi}{M} \quad (3.4)$$

式(3.2), (3.3), (3.4)より状態方程式は、

$$x = \begin{bmatrix} \phi \\ \dot{\phi} \\ z \\ \dot{z} \\ y \\ \dot{y} \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{Fl_y + m_a g d_y \cos \phi}{J} \\ 0 \\ \frac{u \cos \phi - Mg}{M} \\ 0 \\ \frac{u \sin \phi}{M} \end{bmatrix} \text{とすると,}$$

$$\dot{x} = Ax + B \quad (3.5)$$

となる。

3.3 シミュレーション設計と出力結果

(3.5)の状態方程式をもとに設計したシミュレーションのブロック線図を図7に示す。また姿勢角の目標値 ϕ_{ref} 、高度の目標値 z_{ref} から推力に変換する場合にはそれぞれ式(2.5),(2.6)を用いて行った。

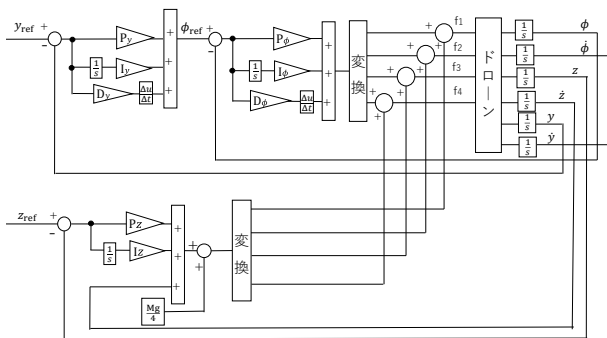


図7 質点を加えたときのブロック線図

今回のブロック線図では、カスケード制御を用いることで姿勢角変化によって慣性力が発生しないように対策を行った。PID制御で使用するそれぞれのゲイン値は表2と同じ値を使用した。

姿勢角 ϕ 、高度 z 、移動距離 y の出力結果をそれぞれ図8, 9, 10に示す。

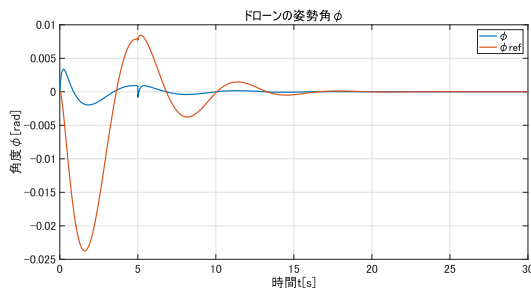


図8 姿勢角の出力結果

質点の追加によって重心のずれが再現され、姿勢角 ϕ が変化することがわかる。カスケード制御を用いたことで、姿勢角目標値 ϕ_{ref} が変化し、姿勢角 ϕ を0に収束させることができた。

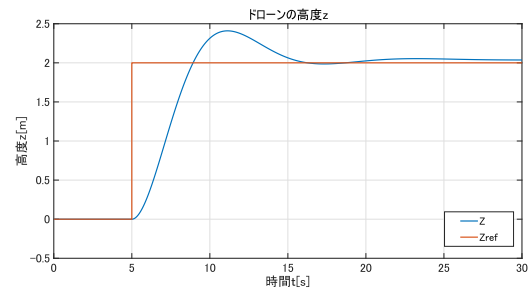


図9 高度の出力結果

初期の重力を打ち消すために加えた $\frac{Mg}{4}$ によって落下させずに飛行させることができたが、高度 z が高度目標値 z_{ref} を上回ってしまいオーバーシュートや定常偏差をなくすることができなかった。また、ゲイン値を変化させることで定常偏差をなくすることはできたが、オーバーシュートが大きくなってしまいあまり良い結果を得ることができなかった。

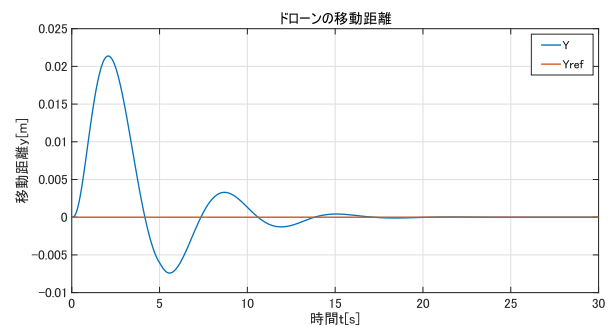


図10 移動距離の出力結果

姿勢角変化によって慣性力が発生し移動距離 y が変化してしまいましたが、カスケード制御を用いることで移動距離目標値 y_{ref} を変化させることなく慣性力を打ち消すことができた。

4 終わりに

本研究では重心のずれが存在するドローンの姿勢角、高度、位置制御を行った。重心のずれを打ち消す方法として、カスケード制御を用いて姿勢角を調整する方法をとった。

今後に残る課題としては、リアルタイムシミュレータを用いた三次元平面でのドローン制御や、実機実験でのドローン制御が必要である。

参考文献

- [1] 米川 翔太:『ビジュアルフィードバックを用いたドローンの位置制御におけるリアルタイムシミュレーションと実機検証』。2021年卒業修士論文南山大学理工学部機械電子制御工学科坂本・中島研究室, 2021.
- [2] 小森脩平, 岡田佳樹, 山田樹:『自律飛行を目的としたドローンの飛行制御』。2018年卒業学士論文南山大学理工学部機械電子制御工学科坂本・中島研究室, 2018.