

スライディングモード制御によるドローンの安定化制御

2020SC084 鈴木亮哉

指導教員：坂本登

1 はじめに

近年、世界的にドローンなどの無人航空機の普及が進んでいる。その使用用途は様々だが、日本においては災害救助や農業分野でのコスト削減などの使用法に注目が集まっている。

これらの使用用途において高い操作性は非常に重要であり、そのためには飛行制御の精度を高める必要がある。現在、実際に当研究室で自作した実機での飛行実験を行った際、離陸した瞬間に姿勢角の問題でドローンが飛行できないといった問題が発生している。そこで本研究では、最終的な目標を姿勢角全体の制御とし、その初めに現在利用しているPID制御よりもロバスト性などの面で優れているスライディングモード制御を角速度制御に用いて角速度の安定性を高めるよう研究を行った。

2 座標系およびパラメータの定義

3次元空間にあるドローンの空間表現を行うには位置と姿勢角が必要である。これらの状態量を表現するために基準となる直交座標系である地上座標系 (Σ_r)、ドローンに固定された直交座標系である機体座標系 (Σ_b) の2つの直交座標系の定義をする。これら2つの直交座標系はどちらも右手座標系である。以下の表1にドローンの物理パラメータを示し、図1に2つの直交座標系の関係を表した図と状態パラメータ、ローターの回転方向を示す。

表1 ドローンの物理パラメータ

記号	名称及び単位
m_b	機体の質量 [kg]
x	機体の x 座標への位置座標 [m]
y	機体の y 座標への位置座標 [m]
z	機体の z 座標への位置座標 [m]
l_x	x 軸からロータまでの距離 [m]
l_y	y 軸からロータまでの距離 [m]
P	機体座標系での角速度 (x 軸周り) [N]
Q	機体座標系での角速度 (y 軸周り) [N]
R	機体座標系での角速度 (z 軸周り) [N]
L	ドローンに働くモーメント (x 軸周り) [Nm]
M	ドローンに働くモーメント (y 軸周り) [Nm]
N	ドローンに働くモーメント (z 軸周り) [Nm]
f_i	ロータ i 番目の推力 [N]
g	重力加速度 [m/s^2]
I	回転テンソル [kgm^2]

表1に示した物理パラメータのほかに、 $\mathbf{u}_f = [f_1 \ f_2 \ f_3 \ f_4]^T$, $f_{all} = f_1 + f_2 + f_3 + f_4$,

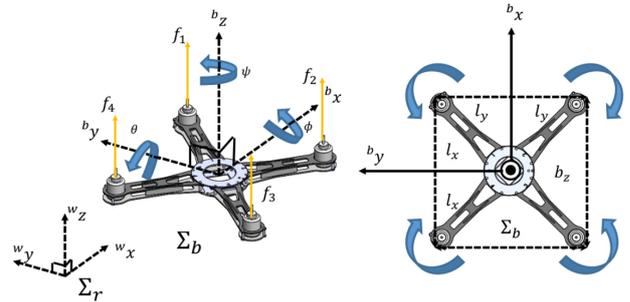


図1 ドローンの座標系及びパラメータ

$\boldsymbol{\omega} = [P \ Q \ R]^T$, $\mathbf{u} = [L \ M \ N]^T$ と定義する。

3 ドローンの回転運動方程式

ドローンに働くモーメント M_f は各軸周りのモーメントの和と粘性抵抗力で表される。各軸周りのモーメントの和 \mathbf{U} [Nm] は次のように表される。ここで、 μ [m] を反トルク係数とし、粘性抵抗力を $\rho\boldsymbol{\omega}$ とする。

$$\mathbf{B}_b = \begin{bmatrix} l_y & -l_y & -l_y & l_y \\ -l_x & -l_x & l_x & l_x \\ -\mu & \mu & -\mu & \mu \end{bmatrix} \quad \mathbf{U} = \mathbf{B}_b \mathbf{u}_f \quad (3.1)$$

$$\mathbf{M}_f = \mathbf{U} - \rho\boldsymbol{\omega} \quad (3.2)$$

次に、以下の機体の慣性テンソル \mathbf{I} [kgm^2] を用いて、ドローンの回転運動方程式を求める。

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

角速度ベクトルを $\boldsymbol{\omega}$ とすると、機体座標系での回転運動方程式は、次となる。

$$\mathbf{I}\dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{I}\boldsymbol{\omega} = \mathbf{U} - \rho\boldsymbol{\omega} \quad (3.4)$$

4 スライディングモード制御を用いた角加速度制御

4.1 スライディングモード制御とは

スライディングモード制御とは、第一に切替超平面 (σ) と呼ばれる空間を作り、制御対象の状態を有限時間で到達及び拘束させる。次に、状態を切替面で滑り動作させながら目標値へ収束させるといった制御法である。本論文ではドローンの飛行制御のうち、姿勢角制御部分にスライディングモード制御を用いて安定化に取り組む。

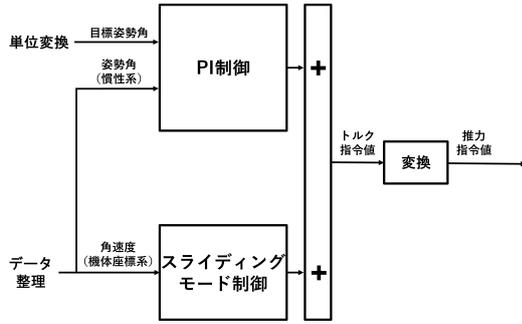


図2 姿勢角制御

4.2 線形化及び切替平面の設定

式(3.4)を線形化した状態空間表現は、

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (4.1)$$

$$A = -I^{-1}\rho \quad B = I^{-1} \quad (4.2)$$

のように表され、切替超平面は $\sigma(x) = Sx$ となる。

ここで、 $x = \omega$ とし、今回は簡易化のため S を (3×3) の単位行列とする。

4.3 スライディングモードコントローラ的设计

本節では切替超平面 $\sigma(x)$ を 0 に拘束するための制御則設計について述べる。まず、 σ の候補関数として次のリアプノフ関数を選ぶ。

$$V = \frac{1}{2}\sigma^T\sigma \quad (4.3)$$

一般にスライディングモード制御の入力は線形制御則 u_{eq} と非線形制御則 u_{nl} の2つの項から構成される。まず $\dot{\sigma}(x) = S\dot{x} = 0$ とおくと、

$$S(Ax + Bu) = 0 \quad (4.4)$$

$$u_{eq} = -(SB)^{-1}SAx \quad (4.5)$$

ここで、 u_{nl} を次式のように定義する。

$$u_{nl} = (SB)^{-1}k \frac{\sigma(x)}{\|\sigma(x)\|} \quad (k < 0) \quad (4.6)$$

以上の式を利用するとリアプノフ関数の微分は次のようになる。

$$\dot{V} = \sigma^T \dot{\sigma} = \sigma^T (SAx + SBu) \quad (4.7)$$

$$= (SB)^{-1}k \frac{\sigma^T(x)\sigma(x)}{\|\sigma(x)\|} \quad (4.8)$$

これより制御則は

$$u = u_{eq} + u_{nl} = -(SB)^{-1}SAx + (SB)^{-1}k \frac{\sigma(x)}{\|\sigma(x)\|} \quad (4.9)$$

となる。

4.4 チャタリングの回避

制御則(4.9)は非線形制御則項が不連続関数となっており、 $\sigma = 0$ 付近でチャタリング(高周波振動)が生じてしまう。そこで微小項 δ を用いて関数を滑らかにする。微小項 δ を用いた制御則を次に示す。

$$u = k \frac{\sigma(x)}{\|\sigma(x)\| + \delta} \quad (4.10)$$

5 シミュレーション

第4章で作成した制御則を検証するために行ったシミュレーションの結果を以下に示す。制御則の設計パラメータを $k = -0.1$, $\delta = 0.1$ とし、 ω の初期条件をそれぞれ $[0.3, -0.25, 0.2]^T$ とした。

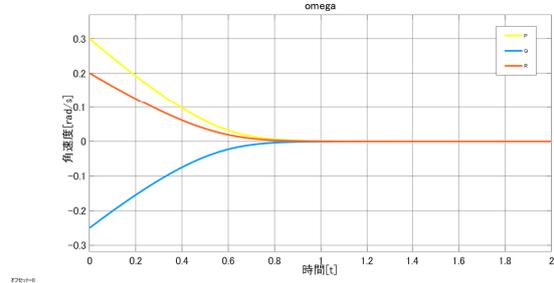


図3 角速度 ω の制御結果

6 参考文献

- [1] 藤野純也・石王宏和：『クォータニオンとカスケード型PIDを用いたドローンの飛行制御に関する研究』。2022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，2022。
- [2] 野波健蔵：『ドローン工学入門 モデリングから制御まで』。コロナ社，東京，2020。
- [3] 増淵正美・川田誠一：『システムのモデリングと非線形制御』。コロナ社，東京，1996。
- [4] Yuri Shtessel・Christopher Edwards・Leonid Fridman・Arie Levant：『Sliding Mode Control and Observation』。Birkhauser，2014。

7 おわりに

本研究では、スライディングモード制御の仕組みを基礎から学び、ドローンの回転運動方程式を求めた後、求めた回転運動方程式とスライディングモード制御を用いてドローンの角速度制御のシミュレーションを行った。

本研究の目的はドローン制御全体の中での離陸時の安定性向上であり、その第一歩としてスライディングモード制御を用いてドローンの角速度制御の精度向上を目指したが、今回は当研究室のシミュレータに適用をさせることができず、線形近似を行った線形システムに適用させた。また、スライディングモード制御の適用をすることはできたが、最適な切替面の設計に取り組み、性能を高めることができなかった。

今後は最適な切替面の設計を行い、実際にドローンのリアルタイムシミュレータに適用させることを目標として研究を行う。そのためには式(3.4)の非線形システムに対するシミュレーションを行い、さらに本研究では触れることができなかった図(2)の姿勢角制御部分のPI制御と合わせてシミュレーションを行う必要がある。