

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

M2019SC015 米川翔太

指導教員：坂本 登

1 はじめに

近年ドローンの市場規模は急激に拡大しており、今後活躍の場は広がっていくと考えられている。

本研究ではドローンのファームウェアとハードの開発を行い、制御則の換装が可能であり、機器汎用性の高いドローンの製作と活用を行うことを目的としている。

本稿の構成として、最初にドローンのモデリングを行い、状態方程式の導出をする。次にドローンに用いた制御則について述べる。そしてドローンの制御基板を始めた実験機器の紹介とファームウェア開発について述べる。その後の実験結果を示し、次にドローンのリアルタイムシミュレータ開発に関しての説明をする。最後に本稿の結論を述べる。なお本研究は同研究室の宮野氏との共同研究であり、本稿では主に制御則開発とシミュレーションについて述べる。そのため実験機器、ファームウェア開発の詳細は宮野氏の論文を参照されたい [1]。

2 ドローンのモデリング

2.1 ドローンの座標系とパラメータ

3次元空間にあるドローンの空間表現を行うためには位置と姿勢角が必要である。これら表現するためには、2つの直交座標系の定義を行う必要がある。1つ目が基準座標系 (Σ_r)、2つ目がドローンに固定された機体座標系 (Σ_b) である。これら2つの座標系はともに右手座標系である。また文字の左上添え字は基準となる座標系、右下添え字は表現される座標系を示しており、 b は機体座標系、 w は基準座標系を示す。以下の表1にドローンの状態パラメータを表し、図1はドローンの座標系 (Σ_r)、(Σ_b) の関係性を示したものである。

表1 ドローンのモデリングに関するパラメータの定義

| 記号 | 名称及び単位 |
|----------|-----------------------|
| m_b | 機体の質量 [kg] |
| x | 機体の x 方向への位置座標 [m] |
| y | 機体の y 方向への位置座標 [m] |
| z | 機体の z 方向への位置座標 [m] |
| ϕ | 機体の姿勢角 (roll 角)[rad] |
| θ | 機体の姿勢角 (pitch 角)[rad] |
| ψ | 機体の姿勢角 (yaw 角)[rad] |
| f_i | ロータ i 番の推力 [N] |

2.2 ドローンの運動方程式

ドローンのような剛体の運動方程式はラグランジュの運動方程式などから導出することができる。したがって、ドローンの運動はラグランジュの運動方程式により、(1)

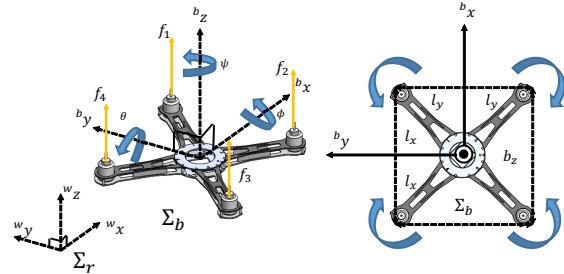


図1 ドローンの座標系

式のように表せる。

$$M(q)\ddot{q} + N(q, \dot{q}) = B_f u \quad (1)$$

ここで、 $M(q)$ は慣性行列であり、 $N(q, \dot{q})$ はコリオリ力項である。 $B_f u$ は並進運動では力、回転運動ではモーメントである。また、 q はドローンにおける一般化座標であり、これは基準座標系から見たドローンの位置、ドローンの姿勢角を含む6次元の縦ベクトルである。ドローンの位置を ${}^w P_b = [x, y, z]^T$ とし、ドローンのオイラー角を $\eta = [\phi, \theta, \psi]^T$ とすると q は $q = [{}^w P_b^T, \eta^T]^T \in \mathbb{R}^6$ となる。さらに f_i はドローンの各モータの推力であり、 $u = [f_1, f_2, f_3, f_4]$ と表すことができる。

2.3 ドローンの非線形状態方程式

ドローンの状態方程式を (1) 式から導出することを考える。状態変数 x を $x = [q^T, \dot{q}^T]^T \in \mathbb{R}^{12}$ として非線形状態方程式は [2] から次のようになる。

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (2)$$

3 制御器設計

この節ではドローンの飛行を行う際のドローンの並進・回転運動を制御するための手法について述べていく。

3.1 姿勢角及び角速度のPD制御

ドローンの運動を制御していくにあたって、角度制御をアウトーループで制御する図2のような制御系の設計を行った。ドローンの姿勢角のP制御を行い、目標姿勢角への追従を行う。そして姿勢角のP制御に対して得られた操作量に角速度のインナーループを構成し、ネガティブフィードバック制御を行うことでドローン機体の飛行安定性の向上を図っている。この制御はドローンの roll 角及び pitch 角に対して行う。

3.2 カスケード制御の概要

カスケード制御は多重ループ構造で制御を行う手法である。カスケード制御では複数の制御器を使用して、1番

4.3 RT target のプログラム

RT target 内ではドローンの飛行のために必要なプログラムが搭載されている。機能としてはIMUから取得した値を処理する「IMU インターフェイス」、FPGA で処理した RC 機器の信号にフィルタリング処理を行う「PWM フィルタ」、キャリブレーション・制御等を実現する「制御部」、モータ ESC に送る信号を生成する「ESC インターフェイス」、ドローンの飛行時のデータを保存する「ロガー」で構成されている。

4.4 FPGA 部のプログラム

FPGA 内では高速処理が必要な PWM 信号を扱っている。機能としては RC 機器から送られた信号を受けとり、PWM 信号の立ち上がり、立ち下がりまでの時間を計測する「PWM reading 部」、RT target 上で算出した Duty cycle を ESC に送る処理を行う「PWM transmitter for motor」がある。

5 実機実験

5.1 実験のシチュエーション

実験を行う上でのシチュエーションとして、3.1 節で述べた姿勢角制御則を採用した。yaw 角は角度制御を使用し、また ESC に送る PWM 信号の周波数を 200[Hz] とし飛行実験を行った。

5.2 実験で用いたゲイン

3.1 節で述べた角度制御を用いて飛行実験を行った。実験時に用いたゲインを表 3 に示す。

表 3 実験のゲイン

| 記号 | ゲイン | 記号 | ゲイン |
|------------|------|------------|----------------------|
| P_ϕ | 0.01 | P_ϕ | 3.0×10^{-3} |
| P_θ | 0.01 | P_θ | 3.0×10^{-3} |
| P_ψ | 0.4 | P_ψ | 0.06 |

5.3 実験結果と考察

実験における roll 角、pitch 角のデータを図 6, 7 に示す。図 6 と 7 から目標値に対して偏差を残してはいるが

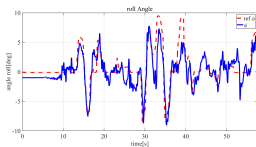


図 6 roll 角

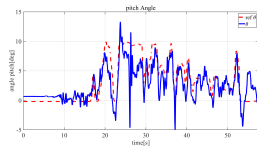


図 7 pitch 角

追従していることがわかる。図 7 における 25[s] に見られる振動は一度ドローンが地面と接触したことに由来するものであるが接触した後もそのまま墜落することなく、再度浮上することができるほどの安定性があることがわかる。今後の課題としては同定した慣性モーメントが x 軸周りと y 軸周りで異なっているので、roll 角と比べや振動的な pitch 角のゲインチューニングを行う必要があると考える。

6 リアルタイムドローンシミュレータ

6.1 リアルタイムシミュレータの概要と利点

リアルタイムシミュレータは MATLAB/Simulink 内で使用できる「Simulink 3D animation」と「AeroSpace Tool box」を用いることで、プロポを用いたシミュレーションが可能となるものである。その利点としてはステップ関数などの非現実的なものを目標値とせず、実際のドローンの飛行と近いシチュエーションでシミュレーションを行うことが可能な点にある。

6.2 リアルタイムシミュレータ構成図

リアルタイムシミュレータのシステム構成図を以下の図 8 に示す。プロポとして使用する機器は Dualshock4(以

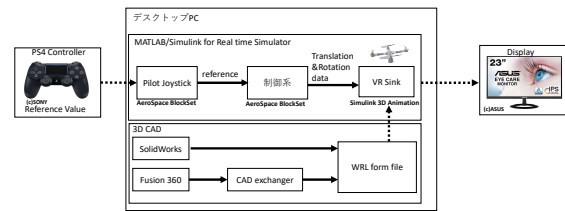


図 8 リアルシミュレータ構成図

下:PS4 コントローラ)である。これをデスクトップ PC に Bluetooth 通信を用いて接続を行う。そして Pilot Joystick ブロック内の設定をすることで、PS4 コントローラを用いることで、操縦者が任意の目標値を印加することが可能となる。そして、制御系の設計を行い、出力値の状態量での並進位置と姿勢角の値を用いて、リアルタイムシミュレータを動作させることができる。

6.3 リアルタイムシミュレータの改良

ドローンのリアルタイムシミュレータをより実機に近づけるために図 9 のように白色ノイズとむだ時間をシミュレータに反映させた。図 9 の赤で囲われている部分は、白色ノイズであり、センサ値と ESC に送る信号値に適用している。また青で囲われている部分はむだ時間を適用した部分である。むだ時間は PS4 コントローラを処理する部分と ESC に送る信号値に適用している。以下の表 4 に

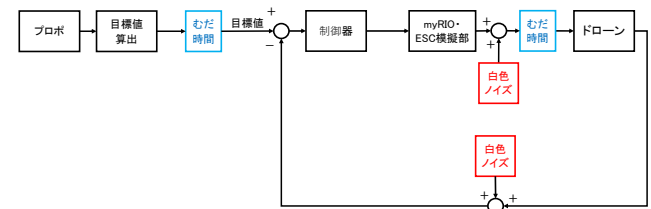


図 9 リアルタイムシミュレータ改良図

適用した遅延時間と加算性白色ノイズの SN 比を示す。表 4 から分かるようにモータ駆動部の SN 比は 10[dB] と設定しており、これは伝送時のノイズとモータが駆動する際に生じるノイズやエネルギー損失を加味している。また、センサ値部に関しては後述する慣性計測装置にはカ

表 4 付加した遅延時間とノイズ

| 付加箇所 | 遅延時間 [ms] | SN 比 [dB] |
|--------|-----------|-----------|
| プロポ目標値 | 1 | 0 |
| モータ駆動部 | 1 | 10 |
| センサ値部 | 1 | 100 |

ルマンフィルタやローパスフィルタの機能を持っており、センサ値の生データにフィルタリングをしているため、伝送時のノイズのみが影響するため、モータ駆動部と比較し小さめに設定をしている。

6.4 リアルタイムシミュレータとドローン実機の応答と実用性

以下の図 10, 図 11 はリアルタイムシミュレータと実機実験、目標値を重ねたグラフである。グラフを見てわかるように 3 つの応答がおおよそ一致しており、リアルタイムシミュレータは現実のドローンの飛行を模擬できている。これによって、モデルベースでのゲインチューニングや模擬実験を行うことが可能である。

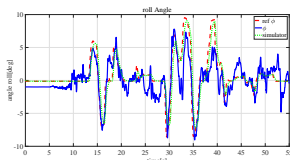


図 10 応答比較 roll 角

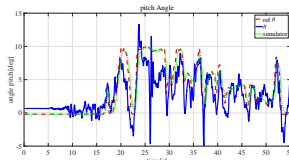


図 11 応答比較 pitch 角

7 リアルタイムシミュレーション結果

7.1 シミュレーション条件

リアルタイムシミュレーションを行うにあたって高度操作は推力の差分構造を用いた。また制御に用いたゲインは以下の表 5, 表 6 である。初期値はすべての状態変数において 0 であり、目標値は PS4 コントローラで印加した。

表 5 速度制御

| 記号 | ゲイン |
|--------------------|----------------------|
| P_{V_x} | 0.2 |
| P_{V_y} | 0.2 |
| P_ϕ | 0.01 |
| P_θ | 0.01 |
| $P_{\dot{\phi}}$ | 3.0×10^{-3} |
| $P_{\dot{\theta}}$ | 3.0×10^{-3} |

表 6 位置制御

| 記号 | ゲイン |
|--------------------|----------------------|
| P_x | 0.1 |
| P_y | 0.1 |
| D_{V_x} | 0.175 |
| D_{V_y} | 0.175 |
| P_ϕ | 0.01 |
| P_θ | 0.01 |
| $P_{\dot{\phi}}$ | 3.0×10^{-3} |
| $P_{\dot{\theta}}$ | 3.0×10^{-3} |

7.2 リアルタイムシミュレータを用いた速度・角度・角速度のカスケード制御の結果

姿勢角制御ではドローンの速度を消せず、横滑りが生じてしまう。この問題点を解決すべく、並進方向の速度制御でのリアルタイムシミュレーションを行った。角度・角速度制御と比較し、実際に操作した際の操作性が向上

した。また、図 12, 図 13 から速度目標値に対して適切に追従していることが分かる。

7.3 リアルタイムシミュレータを用いた位置・角度・角速度のカスケード制御の結果

位置制御でのシミュレーションの目的はドローンの操作性を高めることにある。これによって限られた飛行範囲内でも横滑りすることなく飛行をさせることが可能である。

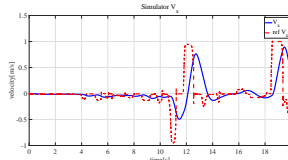


図 12 速度制御 V_x

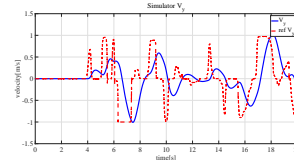


図 13 速度制御 V_y

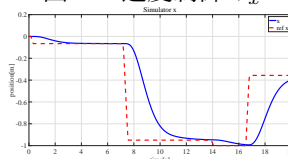


図 14 位置制御 x

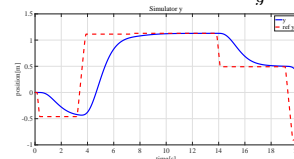


図 15 位置制御 y

8 終わりに

ドローンのモデリング、複数の制御則設計と myRIO を用いたファームウェア開発を行い、さらにハード面での開発としてモジュール作製を行い、ハード・ソフト両面の開発をゼロからし、飛行可能なドローンの製作を達成した。またドローンの運動を再現したリアルタイムシミュレータの製作も行うことができた。

今後は実機実験での速度、位置制御を用いた飛行実験に取り組んでいく必要がある。そのためにはモーションキャプチャによる 3 次元空間の位置および速度の計測と算出を行う必要がある。また古典制御での制御手法のみ提案できているため、現代制御を用いたドローンの自律飛行などを行うことが必要である。

参考文献

- [1] 宮野峻. 倒立振り子付きドローンの安定飛行実験を目的としたリアルタイムシミュレーション開発と実機検証, 2020.
- [2] 林美咲, 宮野峻, 西田裕貴, 米川翔太. クアッドコプターの飛行安定化制御システムの開発. 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.
- [3] William Bolton. Chapter 13 - control systems. In William Bolton, editor, *Instrumentation and Control Systems (Second Edition)*, pp. 281 – 302. Newnes, second edition edition, 2015.
- [4] 健蔵野波. ドローン工学入門：モデリングから制御まで. *Introduction to drone engineering : modeling and control*. コロナ社, 東京, Japan, 2020.9 2020.