

限界感度法を用いたドローンの飛行制御に関する一手法

A method of drone flight control using the limit sensitivity method

宮野 智行¹⁾, 植原 雅貴¹⁾, 中島 正樹¹⁾

Tomoyuki MIYANO, Masaki UEHARA, Masaki NAKAJIMA

Abstract : Drone had become widely used for various applications. However, industrial products were used for drone, and flight control systems inside were remained unknown. In case to develop new applications, drone and the flight control system are required to be developed originally. This paper presents the gain determination process for drone flight control systems, and the gain of the PID control was determined by the modified limit sensitivity method. Numerical simulations and flight experiments were performed to verify the validity of the gain determination process proposed in this paper. Consequently the process using the modified limit sensitivity method is enough stable to control our developing unmanned quad air vehicles.

Key Words : drone, flight control, PID, limit sensitivity method

1 はじめに

近年、ドローン（クワッドコプター）の利用が進んでおり、災害救助や偵察、物資輸送、薬剤や飼料の散布等、各方面への活用が検討されている[1]。ドローンを各利用方法において活用するために、規模や積載物、飛行形態の異なるシステムに組み込むことを考えたとき、フライトコントローラ（以下、FC）の調整が必要となる。一般的にドローン及びそのFCは既製品を使うことが多く、FCの内部処理はブラックボックスとなっているため、ドローンを組み込んだトータルシステムを開発する際にFCを変更し、飛行性能の調整を行うことが難しかった[2]。

本研究では、ドローンを各用途の飛行形態に適応させるためにドローン及びFCを自主開発することを目的とし、飛行制御に用いるPID制御のゲイン決定に関する一考察を示す。PID制御のゲイン決定方法としてはステップ応答法、限界感度法が広く知られているが、そのゲインの決定はプロセス制御など工場内の工業製品の製造過程において用いられることが多く、対象となる製品においては、その特性を考慮してさらに調整を加える必要がある[3][4]。著者らも当初限界感度法のパラメータを用いて制御ゲインを決定し、FCに組み込み飛行実験を試みたが、結果として安定したドローンの飛行制御を行うことができず、ゲイン調整が必要となった。本研究の対象であるドローンに限界感度法を用いた場合、外乱に対して過度に反応することが飛行実験の結果より得られた。このため本論文ではドローンの飛行制御に用いるPID制御のゲイン決定法として、実験装置を用いた限界感度法のゲイン決定のプロセスと修正パラメータを示す。

2 ゲイン調整のための実験モデル

通常ドローンは4機以上のプロペラとモータを搭載し、ロール、ピッチ、ヨーの3軸の自由度を持つが、本研究で用いたPID制御のゲイン決定では、低次元化させるために機体の中心に対して向かい合う1対のプロペラとモータを1軸回りに拘束してゲイン調整を行い、決定したゲインを他の対にも適用する方法で行った。開発の前提となるドローンはヨー軸周りに4機のモータの回転対称とし、ヨー軸周りに90[deg]回転させても同じ形とした。そのためロール軸周りとピッチ軸周りの運動は同じと考えることができる。ゲイン調整のための実験モデルを図1に示す。

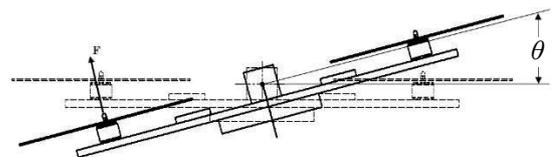


図1 ゲイン調整のための実験モデル

ゲイン調整に際して図1に示した実験装置を制御対象とし、運動方程式を立ててモデル化し、計算機上でシミュレーションを実施して確認を行った。

制御システムを構成する上でも、制御対象の動作がわかれば出力の改善が可能となる。水平状態の平衡点回りに線形化すると、運動方程式は式(1)となり、

$$I\ddot{\theta} = -Mg l \sin\theta - c\dot{\theta} + K v \quad (1)$$

伝達関数 $G(s)$ は式(2)となる。

$$G(s) = \frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{K/I}{s^2 + c/I s + Mgl/I} \quad (2)$$

ここで、 I : 慣性モーメント, θ : 平衡点回りの回転角, l : アーム長, M : アームの質量, c : 抵抗係数, K : 推力係数, V : 操作量, g : 重力定数 である。

図2に示すようにシミュレーションにおいて積分時間を最大に、微分時間を最小に設定してP制御のみとし、比例ゲインを変化させて系に振動現象を発生させてゲインを求めた。

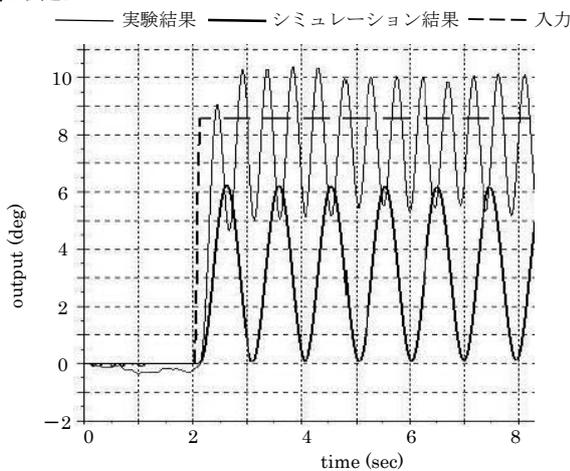


図2 実験モデルのシミュレーション結果

3 限界感度法による実験

実機のドローンのゲイン調整を行うために実験装置を試作した。実験装置は実験モデルで示したように実機のドローンのアームとFC、モータ、プロペラを使用し、1軸周りで自由に回転できるように製作した。制御ゲインの決定手順として、初めに図3に示す実験装置により、比例ゲインを変化させて系が持続振動状態となる点を求め、このときの比例ゲイン Ku , 持続振動の周期 Tu を求める。次に、限界感度法(表1)により、PID制御の比例ゲイン、積分ゲイン、微分ゲインを求めて、実験装置上で供試体のFCに設定し、外乱を加えて応答を確認する。外乱に対して系が安定であることを確認した後、最後に実機のFCにPIDゲインを設定し、ドローンの飛行実験を実施する。

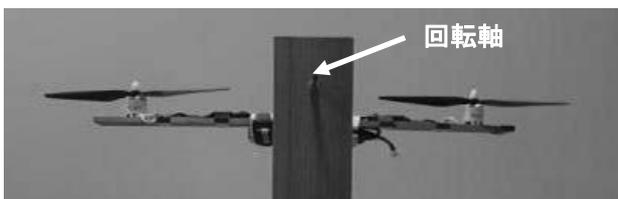


図3 ゲイン調整のための実験装置

3.1 実験装置の結果

実験装置にステップ入力を印加した場合の持続振動状態を図4に示す。図4の持続振動が発生した時の比例ゲイン Ku , 持続振動の周期 Tu はそれぞれ $Ku = 23$, $Tu = 0.467$ [s] となった。実験装置での持続振動状態で測定した比例ゲイン, 持続振動の周期の結果を受けて、表1の限界感度法のパラメータにより、FCのPIDゲインを決定した。

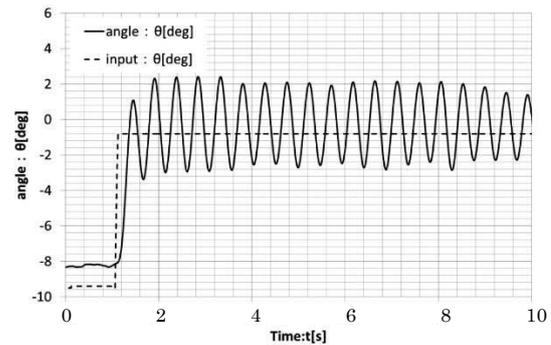


図4 実験装置での持続振動状態 ($Ku=23$, $Tu=0.467$)

表1 限界感度法によるパラメータ

| 時間領域 | P | I | D |
|------|---------|---------|-----------|
| PID | $0.6Ku$ | $0.5Tu$ | $0.125Tu$ |

3.2 ドローンの飛行実験結果

前節の実験により限界感度法を適用した場合の制御ゲインが求めたため、その値をドローンのFCに設定し、実機による飛行実験を行った。飛行実験の結果を図5に示す。実験結果より実機による飛行実験では安定した飛行を継続して行うことができなかった。図5に示す様に、2.4秒及び6.8秒に印加された数[deg]程度の外乱に対し機体の傾きが15~20[deg]程度にまで増大しており、応答が過敏となる現象が発生し、追従性、収束性が得られず、安定した飛行を継続することができなかった。

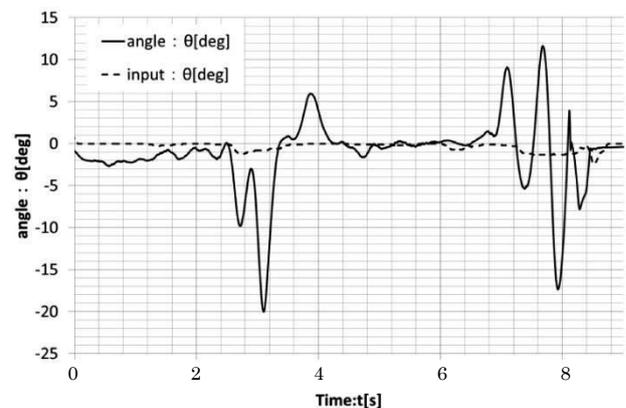


図5 限界感度法によるドローンの飛行実験結果

4 限界感度法の修正パラメータによる実験

前節の実機による飛行実験の結果より、FCのPID制御ゲインを修正して安定した飛行が継続できないか試みた。持続振動時の比例ゲイン Ku 、持続振動の周期 Tu は、限界感度法と同じく、実験装置により求められた $Ku = 23$ 、 $Tu = 0.467$ [s] を用いた。表2に示した限界感度法の修正パラメータによる係数を用いて制御ゲインを決定した。これらの制御ゲインを実機のFCに実装し、飛行実験を実施した。飛行実験の結果を図6に示す。図6より、入力に対して過剰な反応や振動を起こすことがなくなり、安定した飛行を継続することができた。

表2 限界感度法の修正パラメータ

| | P | I | D |
|-----|-----------|-----------|------------|
| PID | $0.522Ku$ | $0.187Tu$ | $0.0322Tu$ |

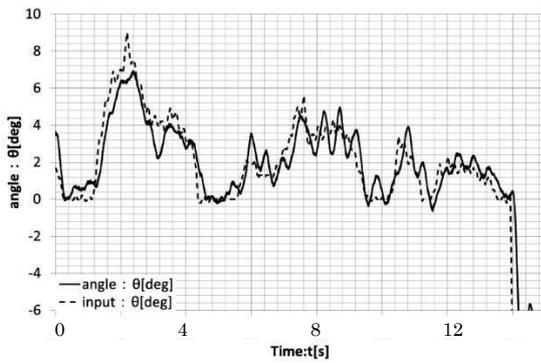


図6 修正パラメータによるドローンの飛行実験結果

5 むすび

本研究では、ドローンの飛行制御におけるPID制御のゲイン調整を限界感度法により決定することを検討した。その結果、限界感度法をそのまま適用してゲイン調整を行った場合、実験装置上ではステップ入力に対する応答は収束するが、ドローンに実装して飛行すると外乱が大きい場合、追従性、収束性を欠き、安定した飛行を継続できないことがわかった。そこで限界感度法のパラメータを修正してゲイン調整を行うことにより、ドローンを安定して飛行させることができた。限界感度法はPID制御において一般的に用いられるゲイン調整法であり、ドローンの場合は機体の規模や飛行形態、推進系の性能等によってゲイン調整が必要となるが、今回、試作した実験装置を用いてゲイン調整を行う手法により、新規に自主開発するドローンのゲイン調整が容易に行えるようになった。

参考文献

- [1] 佐藤昌之, 村岡浩治, "小型 QTW 無人航空機の飛行制御則設計," 日本航空宇宙学会論文集, Vol.64, No.1, pp79-82, 2016.
- [2] 榎本圭祐, 山崎武志, "逆ダイナミクス方とPI制御を用いた速度距離制御系設計," 日本航空宇宙学会論文集, Vol.58, No.681, pp285-294, 2010.
- [3] 二宮哲次郎, 鈴木広一, "D-SEND#2の制御系設計," 日本航空宇宙学会論文集, Vol.64, No.3, pp160-170, 2016.
- [4] 小糸昌範, 内山賢治, "固定翼 UAV における遷移飛行の制御系設計," 日本航空宇宙学会論文集, Vol.60, No.4, pp173-180, 2012.