

令和 5 年 6 月 7 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02356

研究課題名(和文)固定翼UAVのフラットスピンによる自動垂直着陸法の研究

研究課題名(英文) Research on automatic vertical landing method using the flat spin of a fix-wing UAV

研究代表者

東野 伸一郎 (Higashino, Shin-Ichiro)

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：40243901

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,000,000円

研究成果の概要(和文)：固定翼航空機のフラットスピンを利用し、小型固定翼無人航空機の狭小地への自動垂直着陸法への応用を目指して研究を行った。フラットスピンの空力パラメータおよび運動データ取得用の機上センサおよび装置を開発し、飛行試験によって得られたデータによりフラットスピンの空力モデル構築を行った。得られた空力モデルと6自由度の非線形運動方程式を利用し、地上境界層を含む地上風を考慮したフラットスピンシミュレータを開発した。自動垂直着陸のための制御測を設計し、高度150mから半径30m以内の着陸開始点のばらつきを与えたモンテカルロシミュレーションにより、半径7m以内で地上に着陸できることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

狭小地からでも離発着できるが、航続時間・距離の制限が大きい回転翼無人航空機(いわゆるドローン)に対して、ペイロード重量や航続時間・航続距離の面で大きなアドバンテージを持っている固定翼無人航空機を、フラットスピンという、これまでは避けるべき運動のひとつと考えられてきた現象に焦点を当て、積極的に利用することによって自動垂直着陸を実現させることにより、固定翼無人航空機の利用用途を大きく広げることにつながる技術の見通しを得た。なお、狭小地からの固定翼無人航空機の離陸については、カタパルトなど既に実用化されている技術で対応できる。

研究成果の概要(英文)：The study on the utilization of flat spin for automatic vertical landing of a fix-wing small unmanned aerial vehicle(UAV) has been conducted. Several devices for obtaining the air data and motion data during a flat spin in flight tests have been developed. We have constructed an aerodynamic model of a flat spin using the flight data of a test bed fixed-wing UAV. We have also developed a flat spin simulator using a six degree of freedom equations of motion and the developed aerodynamic model considering surface wind including ground boundary layer. The control law for the automatic vertical landing to a specified point on the ground has been also designed. In the Montecarlo simulation with a start altitude of 150m and the scattered horizontal start position within a circle of 30m in radius, it has been confirmed that the UAV can land on the ground within a circle of 10m in radius.

研究分野：飛行力学

キーワード：unmanned aerial vehicles fixed-wing UAV drones flat spin Vertical landing flight testing aerodynamic model simulation

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

小型固定翼無人航空機 (UAV) を用いた実用ミッションにおいては、飛行させる領域の近くに適切な滑走路がある場合はほとんどなく、このことが固定翼無人航空機の利用拡大を妨げている要因の一つであると考えられる。一方、固定翼航空機にはフラットスピンと呼ばれる、通常は避けるべき、あるいは危険な失速後の運動がある。これは失速後、機体姿勢は水平のままクルクルとヘリコプターのブレードのように回転しながら垂直に落下する運動である。一般にはフラットスピンは避けるべき運動であるが、これを積極的に制御する方法が確立できれば、滑走路が確保できないような狭小地においても垂直着陸が可能となる。さらには、それを自動化して定点着陸が可能な方法として確立することができれば、固定翼無人機利用拡大につながると考えられる。

### 2. 研究の目的

フラットスピンを利用した自動垂直着陸実現のために、以下のことを目的とした。

- ・小型固定翼無人航空機を意図的にフラットスピンさせる方法の確立
- ・フラットスピン後、その飛行経路を制御する方法の確立
- ・フラットスピン領域における空気力モデルを飛行試験データから構築
- ・構築した空気力モデルを利用したフラットスピンシミュレータの構築
- ・構築したフラットスピンシミュレータを利用したフラットスピン中に機体を定点に誘導する制御則の設計
- ・フラットスピンシミュレータによる制御成績の評価
- ・飛行試験による制御則の有効性の確認

### 3. 研究の方法

前節で示した研究目的のうち、空気力モデルの構築まではテストベッド機による飛行試験を実施し、フラットスピン中の空気力・空気力モデルを飛行データから推定することによって行う。得られた空気力モデルを用いれば 6 自由度の航空機の運動方程式によってフラットスピンシミュレータを構築することができる。構築したフラットスピンシミュレータを用い、単純な比例制御による自動垂直着陸の制御則を設計し、モンテカルロシミュレーションによる制御成績の評価を行う。最終的には、飛行試験によって制御則の有効性を確認する。

### 4. 研究成果

#### (1) フラットスピン自動垂直着陸のコンセプト

フラットスピン自動垂直着陸は Fig.1 に示すよう、巡航状態からフラットスピに移行する段階(「フラットスピン移行フェーズ」, Transition Phase)と、フラットスピン中にエレベータを操作することにより、水平方向に移動するモード(LT モード)を利用して UAV を着陸ポイントに誘導する段階(「着陸ポイント誘導フェーズ」, Guidance Phase)、着陸に備え姿勢の安定したモード(SD モード)で降下する段階(「着陸フェーズ」, Landing Phase)という 3 つの段階を経て実現される。

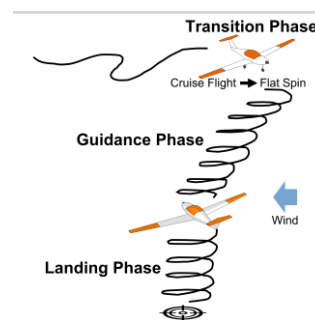


Fig.1: フラットスピン自動垂直着陸のコンセプト

#### (2) フラットスピン飛行試験と空気力モデル同定

飛行試験に使用した機体 Phoenix の外観と機体諸元を Fig.2 及び Table1 にそれぞれ示す。本機体は、南極でのエアロゾルサンプルリターンを目的として開発されたモーターグライダー型 UAV であり、特にフラットスピンに有利となるように設計したわけではない。



Fig.2: Phoenix の機体外観

Table 1: Phoenix 諸元

諸元	数値
全長[m]	1.5
全幅[m]	2.8
翼面積[m <sup>2</sup> ]	0.58
主翼 AR	12.7

①飛行試験結果

Fig. 3 に飛行試験によって得られたSD モード (赤) とLTモード (青)の迎角に対する全機 6 分力空気力係数の散布図を示す. SD モードの  $C_L$ ,  $C_D$ ,  $C_m$  は迎角  $\alpha$  に対して線形性がある. 一方, LT モードの  $C_L$ ,  $C_D$ ,  $C_Y$ ,  $C_m$  は迎角  $\alpha$  に対して非線形かつ非定常な空気力係数である.

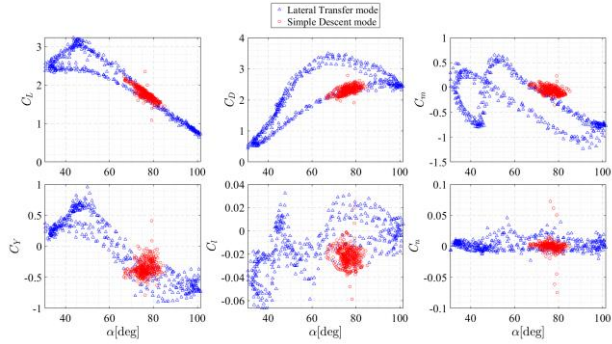


Fig.3: 迎角  $\alpha$  に対する全機 6 分力空気力係数の散布図

②空気力モデルの同定

式 (3.1)~(3.6) は, 準定常仮定 2) の下, 前節で観察した空気力の非線

$$C_L = C_{L_0} + C_{L_\alpha}\alpha + C_{L_{\alpha^2}}\alpha^2 + C_{L_{\dot{q}}}\dot{q} + C_{L_{\delta e}}\delta e \quad (3.1)$$

$$C_D = C_{D_0} + C_{D_\alpha}\alpha + C_{D_{\alpha^2}}\alpha^2 + C_{D_{\dot{q}}}\dot{q} + C_{D_{\delta e}}\delta e \quad (3.2)$$

$$C_m = C_{m_0} + C_{m_\alpha}\alpha + C_{m_{\dot{q}}}\dot{q} + C_{m_{\delta e}}\delta e \quad (3.3)$$

$$C_Y = C_{Y_0} + C_{Y_\beta}\beta + C_{Y_{\beta^2}}\beta^2 + C_{Y_{\dot{p}}}\dot{p} + C_{Y_{\delta e}}\delta e \quad (3.4)$$

$$C_l = C_{l_0} + C_{l_\beta}\beta + C_{l_{\dot{\alpha}}}\dot{\alpha} + C_{l_{\dot{\beta}}}\dot{\beta} + C_{l_{\dot{p}}}\dot{p} \quad (3.5)$$

$$C_n = C_{n_0} + C_{n_\beta}\beta + C_{n_{\dot{\alpha}}}\dot{\alpha} + C_{n_{\dot{\beta}}}\dot{\beta} + C_{n_{\dot{p}}}\dot{p} \quad (3.6)$$

形性と非定常性, 説明変数の多重共線性などを考慮して構築した空気力モデルである. 空気力モデルの各空気力微係数は重回帰分析によって推定する.

Fig. 4 は飛行試験によって得られた空気力係数(青)と式(3.1)~(3.6)の空気力モデルから推定した空気力係数(緑)を比較した散布図である. 式(3.1)~(3.6)の非線形項や時間依存項によって, LT モード中に発生する空気力の非線形性や非定常性がモデル化されている.

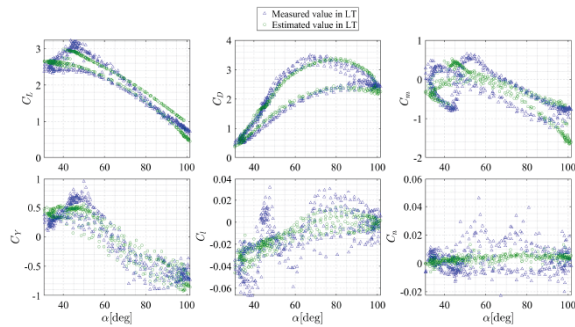


Fig.4: LT モードにおける迎角  $\alpha$  に対する 6 分力空気力係数の推定値と実験値の比較

(3)フラットスピンシミュレータの構築

前述の空気力モデルを利用して構築したフラットスピンシミュレータの実行結果を Fig. 5, Fig. 6 に示す. Fig. 5 の実験の時間履歴 (左) とシミュレーションの時間履歴 (右) はどちらも LT モードであり, 比較するとどちらもほとんどの値が周期的に振動しており, LT モードをシミュレーションによって定性的に再現している. Fig. 6 は円周方向を機首方位角  $\psi$ , 半径方向をエレベータ舵角  $\delta e$ (上)と空気力の水平成分  $X_h$  (下) としたグラフであり, エレベータ舵角を周期的に変化させることによって空気力水平成分を方位によって増減させ, 水平方向に移動する LT モードの特徴をシミュレーションによって定性的に再現できている.

(4)自動垂直着陸のための制御則設計・検証

①制御則設計

前述したフラットスピン自動垂直着陸の 3 つのフェーズのうちの「着陸ポイント誘導フェーズ」の設計方法について説明する. このフェーズは Fig. 7 に示すブロック線図に従って, 風のプロファイルからあらかじめ予測される位置 (Predicted

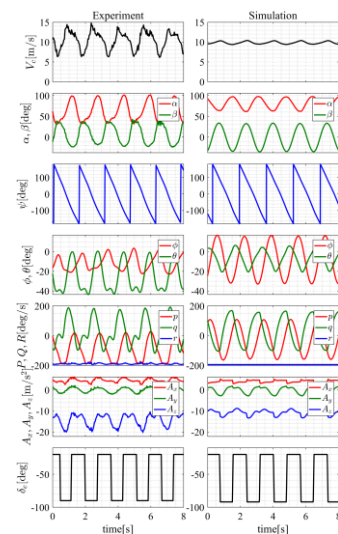


Fig.5: LT モードにおける実験(左)とシミュレーション(右)の時間履歴の比較

Position) と GPS によって計測される実際の位置 (Measured Position) との差をフィードバックし, LT モードの進行方向と移動量を決定するエレベータ舵角を P 制御することによって逐次位置制御を行う.

②シミュレータを使った自動垂直着陸の検証

フラットスピン自動垂直着陸のロバスト性をモンテカルロシミュレーションによって評価する. フラットスピン自動垂直着陸のモンテカルロシミュレーションにおいて, ランダムな要素となるのは「風のゆらぎ」と「GPS サンプルングレートおよび位置誤差によるフラットスピン開始位置のばらつき」である. 風のゆらぎは  $n$  個の正弦波の和として表す.

また, フラットスピン開始位置は定常風を考慮した理想の開始点から半径  $g \text{ apmax}$  の円内からランダムに決定される. Table2 はモンテカルロシミュレーションの実行条件であり, Fig. 8, Fig. 9 はその結果である. Fig. 8 から, 風のゆらぎや開始点によらず, 目標ポイントに向かって上手く位置制御できていることが分かる. また, Fig. 9 からシミュレーションの条件が Table2 の時, 着陸ポイントは目標ポイントから半径  $7\text{m}$  以内の範囲に約  $90\%$  存在することが分かる.

以上の結果から, フラットスピン自動垂直着陸の全フェーズの妥当性と着陸可能な範囲をシミュレーションレベルで確認することができた.

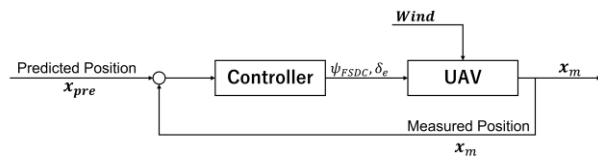


Fig.7: フラットスピンの位置制御におけるブロック線

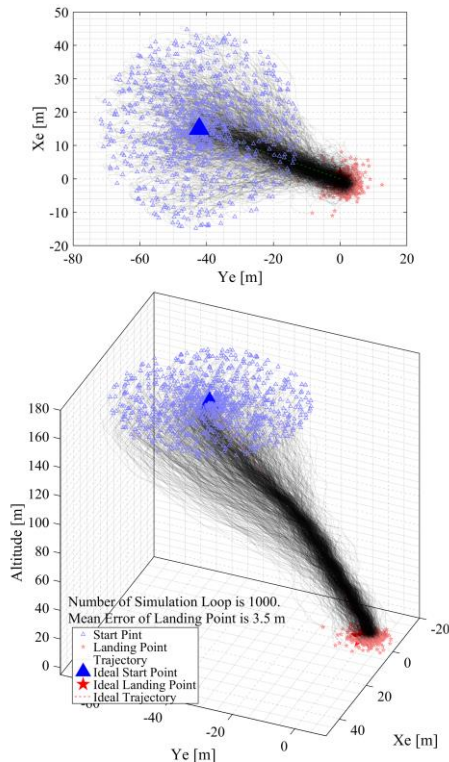


Fig.8: モンテカルロシミュレーションの実行結果( $\sigma = 4\text{m/s}$ )

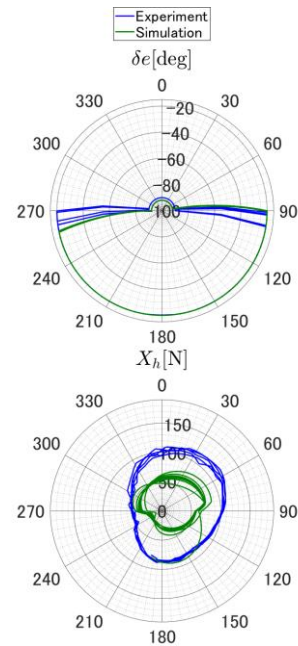


Fig.6: LT モードにおける機首方位  $\phi$  に対するエレベータ舵角  $\delta_e$  (上), 空気力水平成分  $X_h$  (下)の実験とシミュレーションの比較

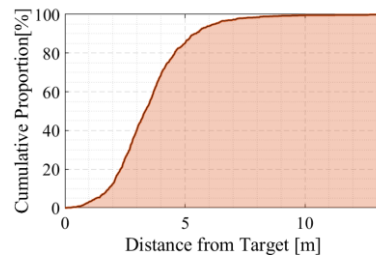


Fig.9: モンテカルロシミュレーションにおいて目標地点からある距離以下に存在している着陸地点の割合



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shin-Ichiro Higashino; Kota Nakama; Yuki Sumitomo	4. 巻 20
2. 論文標題 Experimental Study on the Application of Flat Spin to Vertical Landing of a Fixed-Wing Small UAV	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Transactions of the JSASS / Aerospace Technology Japan	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/tastj.20.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 MIYAZONO Kohki, NAKAMA Kota, SUMITOMO Yuki, HIGASHINO Shin-Ichiro	4. 巻 19
2. 論文標題 Study on a Fixed Point Vertical Landing Method Using the Flat Spin for a Fixed-wing UAV	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN, THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES	6. 最初と最後の頁 131 ~ 140
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/astj.JSASS-D-20-00002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 美間坂伊織, 畑中篤之, 渡久地政直, 東野伸一郎
2. 発表標題 フラットスピンのよる小型翼固定翼UAV の自動垂直着陸のためのエアデータ計測および空力モデル構築
3. 学会等名 日本航空宇宙学会西部支部講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 東野 伸一郎
2. 発表標題 科学観測用固定翼UAVの開発と観測
3. 学会等名 第9回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 白濱厚志, 畑中篤之, 東野伸一郎
2. 発表標題 小型UAVの空力特性推定を目的とした風洞内ロボット支持飛行試験
3. 学会等名 日本航空宇宙学会西部支部講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 畑中篤之, 美間坂伊織, 東野伸一郎
2. 発表標題 小型固定翼無人航空機のフラットスピン領域における空力モデル構築に関する研究
3. 学会等名 日本航空宇宙学会西部支部講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masanao TOGUCHI, Iori Mimasaka, Shin-Ichiro HI- GASHINO
2. 発表標題 The Development of a Flight Simulator for Automatic Vertical Landing of a UAV Using a Flat Spin
3. 学会等名 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡久地政直, 美間坂伊織, 東野伸一郎
2. 発表標題 小型固定翼無人機 の自動垂直定点着陸に関する研究
3. 学会等名 日本航空宇宙学会西部支部講演会 2022
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------