

リセット制御の飛行制御系への応用

An application of reset control for flight control system

○成澤 翔, 佐藤 淳

○ Sho Narisawa, Atsushi Satoh

岩手大学

Iwate University

キーワード: リセットシステム (reset system), 飛行制御 (flight control), SAS (Stability Augmentation System), CAS (Control Augmentation System)

連絡先: 〒 020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5
岩手大学大学院 工学研究科 機械システム工学専攻

佐藤 淳, Tel: 019-621-6404, E-mail: satsushi@iwate-u.ac.jp

1. 緒言

ハイブリッドシステム¹⁾とは連続時間ダイナミクスと離散時間ダイナミクスが混在するシステムである。リセットシステムは連続時間線形システムにリセット動作を加えたシステムであり、ハイブリッドシステムの一つである。リセット動作とは、システムの状態量が適当な代数的条件を満たしたときに状態を瞬間的に遷移させることができる。連続時間フィードバック制御にリセット動作を加えたリセット制御は、ロバスト安定性や制御性能を向上させる手法として期待されている。

リセット制御は従来プラント制御等の比較的遅いダイナミクスを持つシステムに対し応用されてきたが、本研究では比較的速いダイナミクスを持つ小型 UAV (Unmanned Aerial Vehicle) の飛行制御系への応用を示す。

また、今回示す設計例で用いるリセット発生条件は、Clegg²⁾が提案したものに従い、地上パ

イロットの操舵応答の速応性および減衰特性の向上を目指す。これによりパイロットのワークロードを低減し、飛行性の向上に貢献する。

2. リセット制御

2.1 リセットシステム

リセットシステムは状態が代数的条件を満たしたときに、状態がジャンプするシステムである。リセットシステムの状態空間表現は次のようである。

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad \text{if } x \in \mathcal{F} \quad (1a)$$

$$x^+ = A_r x \quad \text{if } x \in \mathcal{J} \quad (1b)$$

$$y = Cx \quad (1c)$$

$x \in \mathcal{J}$ のときリセットが発生し、1b 式のジャンプ方程式に従い、状態は x から x^+ へ瞬間的

に遷移することができる。また集合 \mathcal{F}, \mathcal{J} は対称行列 M を用いて次のように表わされるものを考える。

$$\mathcal{F} := \{W(x) = x^T M x \leq 0\} \quad (2a)$$

$$\mathcal{J} := \{W(x) = x^T M x \geq 0\} \quad (2b)$$

2.2 Temporal regularization

リセットシステムには一般に有限時間内にリセット間隔が0に収束し、リセット回数が無限大に発散するゼノ解が存在する。ゼノ解ではゼノ時刻以降に解が延長できないため、シミュレーションや実装が困難になる。

この現象を避けるために、リセットシステムに付加的なタイマー要素を導入し、リセットが発生してもある一定時間 ρ が経過するまで次のリセットが発生しないようリセット条件の変更を行う手法を **Temporal regularization** と呼ぶ。

すなわち、式 (2a),(2b) にタイマー要素 $\tau = 1$ を導入し、次のようなリセット発生条件を考える。

$$\mathcal{F} := \{W(x) = x^T M x \leq 0 \text{ or } \tau \leq \rho\} \quad (3a)$$

$$\mathcal{J} := \{W(x) = x^T M x \geq 0 \text{ and } \tau \geq \rho\} \quad (3b)$$

3. QTW-UAV

3.1 機体の特徴

QTW-UAV(Quad Tilt Wing Unmanned Aerial Vehicle)²⁾ は JAXA(宇宙航空研究開発機構)によって提案されている無人航空機で (Fig. 1)、前後に2枚のティルト翼を配置し、各翼に推進用プロペラが存在する。ティルト翼は機体の前後方向水平の軸に対して平行から垂直まで傾けることができ、固定翼機モードと回転翼機モードへ飛行形態を変化させることが可能である。回転翼機モードにおける垂直離着陸能力と固定翼機モー

ドにおける高速巡航能力を持つ、VTOL(Vertical Take Off and Landing) 機の一つである。



Fig. 1 JAXA, QTW-UAV

3.2 ゲインスケジュールド制御

ゲインスケジュールド制御とは、制御対象の動特性の大幅な変化に対応するために、予め動作点ごとに制御器パラメータを決めておき、動作点間では適当に補間した制御器パラメータを利用する制御パラメータである。

QTW-UAV の場合は、離陸から巡航までの遷移過程におけるティルト角の角度によって設計点を定める。

3.3 飛行制御系の構造

QTW-UAV の飛行制御系は、PFCS(Primary Flight Control System)、SAS(Stability Augmentation System)、CAS(Control Augmentation System)によって構成されている。

QTW-UAV では制御入力舵面の効率がティルト翼の角度に応じて著しく変化するため、PFCS はティルト角に応じてフラップロン、ラダー、推力の入力の配分をスケジュールするものである。

SAS は機体運動の安定度を増大し、過渡特性を改善するためのものである。すなわち機体固有の操舵応答より減衰が悪く振動的であるような場合に、減衰性を改善し、安定へ近づけるものである。

CASは機体の不満足な動特性を改善し、良好な操縦性を実現させるシステムである。CASを使用することで、正確な姿勢保持が容易になり、パイロットのワークロードを軽減することができる。

PFCS,SAS,CASはゲインスケジュールド制御に則って設計され、各設計点ごとにゲインを決定し、設計点間では前後の設計点から線形的に補間したゲインを使用する。

4. リセット制御に基づく飛行制御系の提案

4.1 QTW-UAVの縦の飛行制御系

JAXAが提案する縦運動制御系をFig. 2に示す。

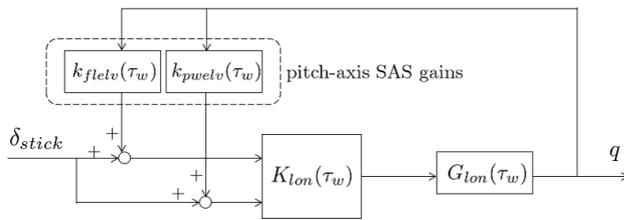


Fig. 2 QTW-UAVの縦運動制御系

τ_w は主翼のテイルト角を表わし、 $G_{lon}(\tau_w)$ は各設計点における機体の線形近似モデルのシステム行列を線形補間した運動モデル、 $K_{lon}(\tau_w)$ はPFCSを表し、 $k_{flelv}(\tau_w)$ 、 $k_{pwelv}(\tau_w)$ はSASゲインを表わす。

4.2 位相進みリセット補償器

位相進み補償はフィードバック系の過渡応答の改善や系の安定化に用いられる。位相進み補償器は次の式で与えられる。

$$G_{lead} = K_{lead} \frac{T_{lead}s + 1}{\alpha T_{lead}s + 1} \quad (4)$$

α は低周波ゲインの増加量を決定する設計パラメータ、 T_{lead} は時定数、 K_{lead} はゲイン補償である。

JAXA設計の制御系(Fig. 2)に位相進み補償器を加え、速応性の改善を試みる(Fig. 3)。

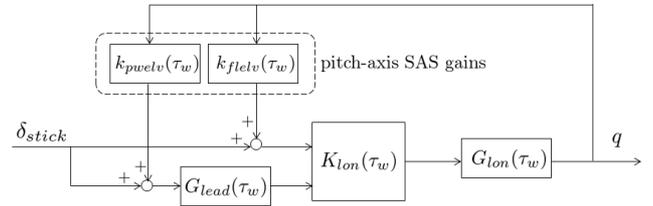


Fig. 3 位相進み補償を加えた縦運動制御系

JAXA設計モデルと位相進み補償モデルとで比較を行い、 $\delta_{\theta stick}$ へステップ入力を加えたときのピッチ角 θ とピッチ角速度 q の時間応答をFig. 4に示す。

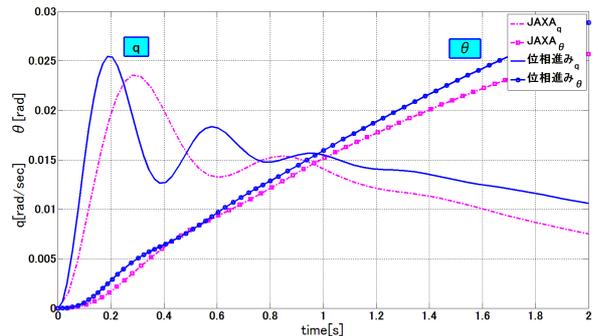


Fig. 4 位相進み補償を用いた場合のステップ応答

Fig. 4から、速応性が改善された一方で、ピッチ角速度 q のオーバーシュートが大きくなり減衰特性が悪化していることが確認できる。

位相進み補償器を加えたことによる減衰特性の悪化を改善するため、位相進み補償器にリセット動作を加える。一般的に、減衰特性の改善を期待して利用されるClegg形のリセット発生条件に基づく、次のようなリセット則を用いる。すなわち、位相進み補償器への入力 e 、状態 x_l の符号が異なるときリセットが発生するものとし、

$$x = \begin{bmatrix} e \\ x_l \end{bmatrix}, M = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

と決定した。

また、リセット後の状態量を x_l^+ 、ジャンプゲインを J とし、次のようなジャンプを行うものとした。

$$x_l^+ = Je \quad (6)$$

リセットモデルのピッチ角速度 q の時間応答を測り、リセット動作付与の有効性を確認する。時間応答を Fig. 5 に示す。

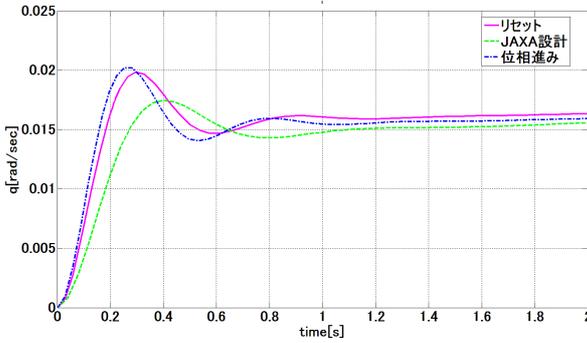


Fig. 5 位相進みリセット補償を用いた場合のステップ応答

Fig. 5 より、リセット動作により減衰特性が改善されていることが確認できる。

以上により、位相進み補償器により速応性が改善され、リセット動作により減衰特性を改善することができ、制御性能の向上が期待できる。

5. シミュレーション

MATLAB Simulink による数値シミュレーションを利用して位相進みリセット補償器のチューニングを行った。ティルト角は 90 度および 70 度の飛行状態とし、CAS は起動しないものとする。なお、Temporal regularization は $\rho = 0.007[s]$ とした。

5.1 Tilt90

縦の制御系の結果を示す。JAXA 規定の SAS ゲイン K_{pwelv} 、位相進み補償器のパラメータ α 、 T_{lead} 、 K_{lead} を Table 1 に示す。また、リセット動作のジャンプゲインを試行錯誤的に $J = 0.7$ と決定した。 $\delta_{\theta stick}$ にステップ入力を加えたときのピッチ角 θ とピッチ角速度 q の応答を Fig. 6 に示す。

Table 1 Tilt90 における縦の制御系パラメータ

K_{pwelv}	69
α	0.5
T_{lead}	0.1
K_{lead}	1.3

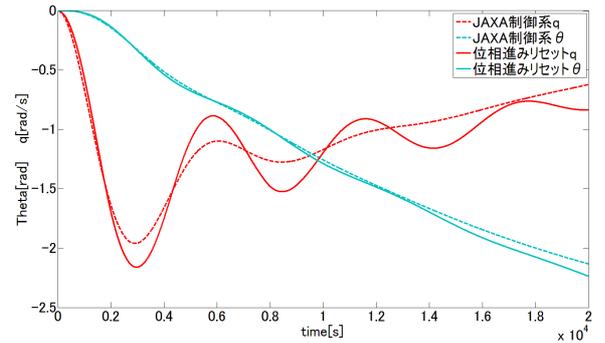


Fig. 6 θ, q のステップ応答

次に、横の制御系の結果を示す。JAXA 規定の SAS ゲイン K_{pwail} 、 K_{flrud} 、位相進み補償器のパラメータ α 、 T_{lead} 、 K_{lead} を Table 2 に示す。また、リセット動作のジャンプゲインを試行錯誤的に $J = 0.3$ と決定した。 $\delta_{\phi stick}$ にステップ入力を加えたときのロール角 ϕ とロール角速度 p の応答を Fig. 7 に示す。

Table 2 Tilt90 における横の制御系パラメータ

K_{pwail}	29
α	0.25
T_{lead}	0.1
K_{lead}	1

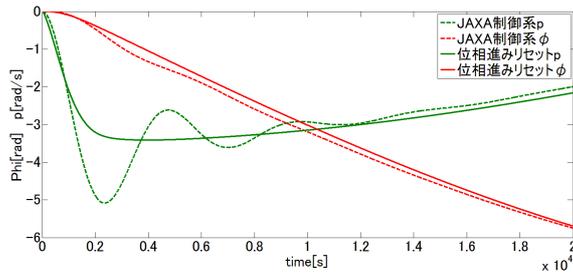


Fig. 7 ϕ, p のステップ応答

5.2 Tilt70

§5.1と同様に縦運動系のシミュレーションを行う。JAXA 規定の SAS ゲイン K_{flelv}, K_{pwelv} 、位相進み補償器のパラメータ $\alpha, T_{lead}, K_{lead}$ を Table 3 に示す。また、リセット動作のジャンプゲインを試行錯誤的に $J = 0.7$ と決定した。 $\delta_{\theta stick}$ にステップ入力を加えたときのピッチ角 θ とピッチ角速度 q の時間応答を Fig. 8 に示す。

Table 3 Tilt70 における縦の制御系パラメータ

K_{flelv}	86
K_{pwelv}	69
α	0.5
T_{lead}	0.1
K_{lead}	1.5

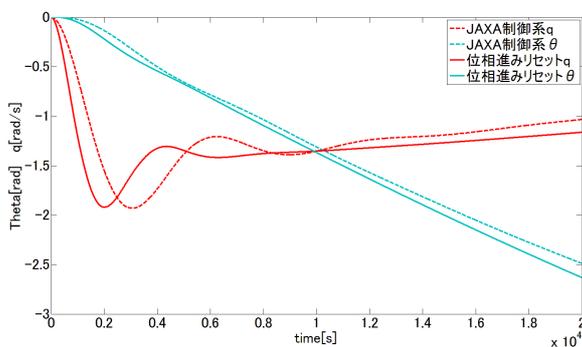


Fig. 8 θ, q のステップ応答

横運動系のシミュレーションを行う。JAXA 規定の SAS ゲイン $K_{pwail}, K_{flrud}, K_{rud}$ 、位相進み

補償器のパラメータ $\alpha, T_{lead}, K_{lead}$ を Table 4 に示す。また、リセット動作のジャンプゲインを試行錯誤的に $J = 0.6$ と決定した。 $\delta_{\phi stick}$ にステップ入力を加えたときのロール角 ϕ とロール角速度 p の時間応答を Fig. 9 に示す。

Table 4 Tilt70 における横の制御系パラメータ

K_{pwail}	29
K_{flrud}	86
K_{rud}	100
α	0.5
T_{lead}	0.1
K_{lead}	1

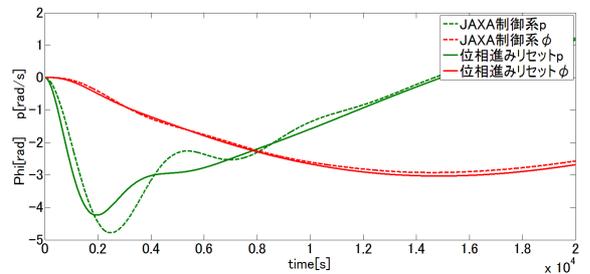


Fig. 9 ϕ, p のステップ応答

ティルト角 90 度の結果では、縦の制御系は改善が確認できなかったが、横の制御系は立ち上がりの速さおよび減衰特性を改善することができた。

ティルト角 70 度の結果では、縦の制御系と横の制御系共に、立ち上がりの速さおよび減衰特性を改善することができた。

以上の結果から位相進み補償器により速応性を、リセット動作により減衰特性を改善でき、本研究で設計した制御系は JAXA の設計した従来の制御系と比較し、制御性能の向上が確認できる。

6. 飛行実験

JAXA 調布航空宇宙センター飛行場分室にて、提案するリセット飛行制御系を用いた飛行実験を

行った。Tilt90におけるホバリング実験とTilt90,70の遷移飛行の実験の二回の実験を行う。

6.1 Tilt90(SASのみ)での飛行

Tilt90のホバリング実験の結果を示す。SASのみの状態での実験とし、モデル化誤差により安定性が損なわれていないかを確認しリセット制御系の実用可能性を示す。 ϕ と θ のパイロット入力と機体の応答をFig. 10, Fig. 11に示す。

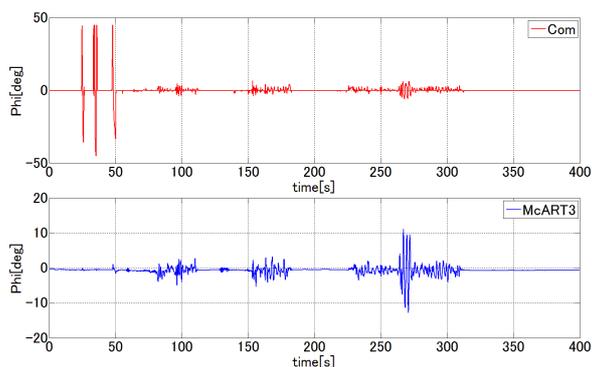


Fig. 10 ϕ のパイロット入力と機体の応答

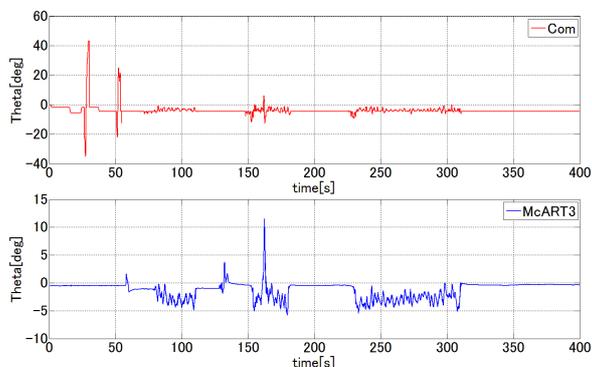


Fig. 11 θ のパイロット入力と機体の応答

以上の結果から、機体の応答に不安定な現象が生じていないことが確認されるため、リセット制御系が飛行制御系へ実装可能であることが判断できる。

6.2 Tilt90,70の遷移飛行

Tilt90,70の遷移飛行の結果を示す。屋外において、CASを起動した状態で実験を行い、ティルト角の変化による飛行形態の変動に伴い安定性が確保されているかを確認する。 ϕ と θ のパイロット入力と機体の応答をFig. 12に、ティルト角の切替をFig. 13に示す。

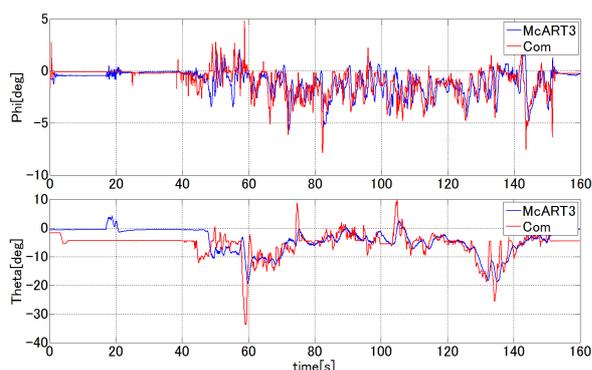


Fig. 12 ϕ, θ のパイロット入力と機体の応答

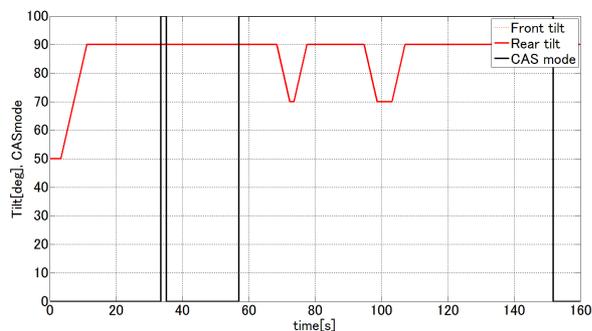


Fig. 13 パイロットによるCASとティルト角の切替

以上の結果から、CASを起動した状態で、機体の応答がパイロットの入力に追従しており、ティルト角の変化があっても不安定な現象が生じていないことが確認できる。よって、飛行制御系においてCASが有効であるということが判断できる。

7. 結言

本研究では、リセット制御を飛行制御系に応用し、`simulink`によるシミュレーションでは速応性と減衰特性の改善が示され、リセット制御の有効性を確認した。また、飛行実験によりリセット制御の飛行制御系への実用可能性を示した。今後は、ホバリング状態から水平飛行状態までの完全遷移飛行の実験を行い、完全遷移飛行を実現する。

謝辞

本研究は平成 25 年度 JAXA 航空本部公募型研究「ハイブリッド制御によるティルトウイング機のロバスト誘導制御技術の開発」の一部として行った。

研究の遂行において、JAXA 航空本部、村岡様、佐藤様のご支援に感謝します。飛行実験においてテクレンジ(株) 宇山様、(株) シーズプロジェクト 大高様にご協力頂いたことに謝意を表す。

参考文献

- 1) RAFAL GOEBEL, RICARDO G. SANFELICE and ANDREW R. TEEL, ROBUST STABILITY AND CONTROL FOR SYSTEMS THAT COMBINE CONTINUOUS-TIME AND DISCRETE-TIME DYNAMICS, IEEE CONTROL SYSTEMS MAGAZINE, APRIL, (2009).
- 2) J. C. Clegg, *A nonlinear integrator for servomechanisms*, Trans. of AIEE, 77(Part-II), 41-42 (1958).
- 3) Masayuki Sato and Koji Muraoka, Flight Test Verification of Flight Controller for Quad Tilt Wing Unmanned Aerial Vehicle.