

令和 3 年 6 月 23 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04192

研究課題名（和文）出力FB型リセットシステムの系統的設計法の構築と衝突を含むシステム制御への応用

研究課題名（英文）Development of systematic design technique of output-feedback type reset system and its applications to the control of the systems with collision

研究代表者

佐藤 淳（Sato, Atsushi）

岩手大学・理工学部・准教授

研究者番号：60324969

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：リセットシステムは連続的状態遷移に加えて、状態依存イベントの発生時には状態のジャンプを生じるハイブリッドシステムの一つである。本研究では出力フィードバック型リセット制御の設計理論の構築とその応用に向けた研究を実施した。出力フィードバック型リセットシステムがジャンプ不動点を持つ場合には既存のNesic et al.の安定条件が成立しないことに注目し、新たな安定条件の導出を試みた。共通のリセット条件に従う2つのリセットシステムの出力フィードバック結合について、ジャンプ不動点の存在を許容する新たなリアプノフ関数にもとづく漸近安定条件の導出を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

リセットシステムはハイブリッドシステムの一つであり、例えば床の上でバウンドするボールの運動のように衝突を含むような力学系のモデルとして用いられる。リセット制御では仮想的な衝突に相当する振る舞いをフィードバック制御器に含めることで、システムが条件を満たすときに瞬間的に系のエネルギーを消散させようとするもので、フィードバック系のロバスト安定性や時間応答特性の改善への効果が期待されている。本研究では実用的なリセット制御系の設計手法の確立を目指して従来手法では安定性の判別が不可能であった出力フィードバック型リセットシステムに対する新たな安定条件を導いた点に学術的意義がある。

研究成果の概要（英文）：Reset systems, a subclass of the hybrid systems, is the dynamical system with continuous state transition and discontinuous state jump which is triggered by a state dependent event. In this work, a research toward the reset control synthesis and its application was conducted. The principal investigator pointed out the existing stability condition by Nesic et al. does not apply to the output-feedback type reset systems which have fixed points for state jumping, and tried to derive a new stability condition. For the output-feedback connection of the reset systems with a common reset condition, an asymptotic stability condition based on a new type of Lyapunov function which permits the existence of the fixed points for state jumping.

研究分野：システム制御理論

キーワード：リセットシステム ハイブリッドシステム 安定解析

### 1. 研究開始当初の背景

リセットシステムは連続の状態遷移に加え、状態依存イベントの発生時には状態ジャンプを生じるシステムである。連続時間制御にこの種の状態ジャンプを付加して性能向上を狙う“リセット制御”が今世紀に入り盛んに研究されてきた。古典的なリセットシステムの研究では記述関数法などにもとづく近似的な解析が行われてきたが、近年のハイブリッドシステムに関する理論的枠組みの発展に伴いハイブリッドオートマトン表現にもとづく様々な結果(漸近安定条件, L2安定条件など)や実システムへの応用が行われてきた。しかし研究開始当初において、実用上重要な問題のひとつである出力フィードバック安定化制御の存在条件や系統的設計手法などに関する研究結果は不十分であった。

### 2. 研究の目的

リセット制御は連続時間プラントに対し、閉ループ系をリセットシステムにするようなハイブリッド制御則を適用するものである。リセット制御則は連続時間フィードバックとフィードバック型ジャンプとの組み合わせで構成され、後者による瞬間的エネルギー消散が安定化や制御性能の向上に貢献している。リセット制御の利点として線形制御の性能限界の緩和 (Beker, Banos) や、非線形最適制御の低次リセット制御則による優れた近似 (Aangenent) などの結果が知られており、実システムへの応用も行われている。一方リセット制御の系統的設計に関する結果は少なく、アンチwindアップ制御への応用 (Tarbouriech 2011)、H<sub>∞</sub>タイプ制御 (Fichera 2012)、動的状態フィードバック制御 (Atsushi IFAC2011) などに関する結果が存在する。

しかしこれらの既存結果は、リセット制御の実用化を考えると以下のような点で不十分である。

- Fichera の結果は、リセット条件およびジャンプ則を特定の構造に固定した場合に限定されており、リセット制御の自由度が制御目的の達成に十分利用されていない。
- いずれの既存結果も、リセット条件とジャンプ則の少なくとも一方においてプラントの全状態情報が入手可能であることを必要としている (状態フィードバック制御)。

出力フィードバック型リセットシステムの安定解析に関する限定的な結果が (Atsushi ECC2015) によって示されているが、実質的に全状態の情報を必要とするもので不完全である。また Nesic et al. (2008) は出力フィードバック型に関する結果であるが、設計に利用するのは困難である。そこで本研究課題では出力フィードバック型リセット制御器の系統的設計に利用可能なリアプノフベースの安定条件を導出することを当初の研究の目的とした。

またリセットシステムは力学系としては衝突現象を含むような系のモデル化に適しており、得られた結果をインパルスの加速度外乱や壁での反発の影響を効果的に抑圧する制御系の設計に応用することを構想した。

### 3. 研究の方法

これまでに申請者によって、状態フィードバックによる、非構造的リセット制御器の行列不等式アプローチによる系統的設計手法が示されている (Atsushi IFAC2011)。またその発展として、出力フィードバック型リセットシステムの安定解析に関する結果が申請者 (Atsushi ECC2015) によって示されているが、この結果はリセット条件とジャンプ則を個別に見ると出力フィードバック型であるものの、両者を合わせると全状態の情報が得られるような場合にしか適用できない不十分なものであった。その原因は以下のようなものである。

出力フィードバック型リセットシステムのハイブリッドオートマトン表現は次のようになる。

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bd, & \text{if } x \in \mathcal{F}_M \\ x^+ &= \mathcal{A}x, & \text{if } x \in \mathcal{J}_M \\ z &= Cx, \end{aligned} \quad \begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} A_p & B_{pu}C_c \\ B_cC_{pc} & A_c \end{bmatrix}, \\ \mathcal{A} &= \begin{bmatrix} I & 0 \\ B_cC_{pc} & \mathcal{A}_c \end{bmatrix}, \\ M &= \begin{bmatrix} C_{pc}^T M_1 C_{pc} & C_{pc}^T M_2^T \\ M_2 C_{pc} & M_3 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$x = \begin{bmatrix} x_p \\ x_c \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} B_{pd} \\ 0 \end{bmatrix}, C = [C_{pz} \quad 0]$$

通常、プラントの制御出力行列  $C_{pc}$  は列フルランクではない。そのためジャンプ時の状態遷移を決定する  $\mathcal{A}$  行列の構造からジャンプ不動点となる初期値 ( $0 \neq x_p \in \ker(C_{pc}), x_c = 0$ ) が常に存在する。これは上記の初期値から始まる離散解を許容してしまうと出力フィードバック型リセットシステムは漸近安定になり得ないことを意味する。またジャンプ不動点の存在から、Zaccarian (2011) で提案されているフロー及びジャンプの遷移において厳密に減少するタイプのリアプノフ関数は存在しない。以上の事実は出力フィードバック型リセットシステムの安定解析のために新たなタイプのリアプノフベースの安定条件が必要であることを意味している。

そこで本研究では状態空間の $\ker(C_{pc})$ およびその直交補空間との直和分解に基づく、ジャンプ不動点の存在を許すような新たなリアプノフ関数の構成について考えた。

#### 4. 研究成果

##### (1) 出力フィードバック型リセットシステムの漸近安定条件に関する結果

この種のシステムが漸近安定であるためには許容される解の中から前述の離散解が排除されていることが必要であり、これは時間正則化を導入することで可能になる。また上記の初期値は制御出力からは観測できないため、システムが出力フィードバック安定化可能であるためにはそのような初期値から始まる解の $x_p$ が $\ker(C_{pc})$ を脱出するか、またはフローのみで平衡点へ漸近することが必要であると考えられる。これはある種の可検出性の成立を要求している。Zaccarian (2011)の結果では許容されないが、平衡点へ漸近する解の例を図1に示す。

そこで本研究では状態空間の直和分解 $\ker(C_{pc}) \oplus \text{img}(C_{pc}^T)$ ,  $x = x_1 + x_2$ ,  $x_1 \in \ker(C_{pc})$ ,  $x_2 \in$

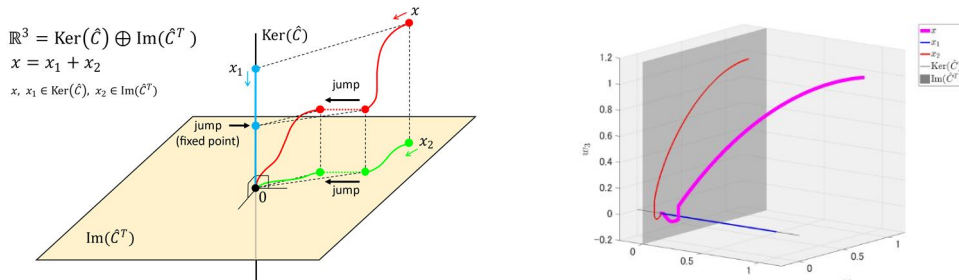


図1 従来の安定条件 (Zaccarian 2011) を満たすシステムでは許容されない解の例

$\text{img}(C_{pc}^T)$ を導入し、リアプノフ関数 $V(x) = V_1(x_1) + V_2(x_2)$ を導入する。ここで $V_1$ は状態の遷移とともに厳密に減少する項であり、 $V_2$ はフローでは厳密に減少するがジャンプでは非増加となる項である。 $V_2$ の存在により前述のジャンプ不動点を含む、リセット判定出力から不可観測であるような有効なジャンプモードの存在が許容されるようになり、またリアプノフ関数に関する適切な条件を導入することでそれらのモードが励起されていてもフローにおいて $V$ が厳密に減少することを保証することができる。そのため時間正則化により well-posedness を保証すれば任意の初期値について $\lim_{t \rightarrow \infty} V(x(t)) = 0$ と言える。このリアプノフ関数は必ずしも厳密に減少しないため Zaccarian (2011)の結果では安定判別が不可能であったシステムに対しても適用できるとい意味で保守性が低減される。なお Nesic et al. (2008)では必ずしも厳密に減少しないリアプノフ関数を用いた安定条件が示されているがこれは $Ax \in \mathcal{F}_M$ という自明ではない条件の成立が前提となっており、本研究の結果はそのような前提を必要としない点が異なる。また本研究で提案するリアプノフ関数にもとづく代数的安定条件を行列不等式アプローチにより導出することが可能であり、近日中に発表を予定している。これはフロー及びジャンプにおけるリアプノフ関数の減少に対応する2本の不等式条件で表され、従来の類似の結果ではリアプノフ関数の減少が保証される領域と $\mathcal{F}_M, \mathcal{J}_m$ は等しいとされていたのに対して、本結果ではリセット判定出力から Schur 不可検出なモードの存在を考慮して $\mathcal{F}_M, \mathcal{J}_m$ とは異なる領域を考えるとこに特徴がある。

##### (2) マルチコプターが壁との衝突から受ける外乱の効果的な抑圧に関する結果

マルチコプターの運動モデルは主に機体の剛体運動と、回転翼(プロペラ)で生じる空気力に由来する推力およびトルクの発生モデルから構成される。従来のマルチコプターの飛行制御に関する研究ではプロペラに発生する空気力はスロットルやプロペラ回転速度の関数としてモデル化されていることが多いが、静止大気中でホバリングしている状態まわりの微小な擾乱運動を考えている場合を除き適切ではない。これはプロペラの推力及びトルク特性は回転速度だけでなく軸方向の流入速度にも依存するためであり、これらの比を含む特性量である進行率の関数としてモデル化することが適切である。また実用上重要な低進行率領域のプロペラ特性は風洞試験で計測することが難しいためそのような特性計測の報告は少ない。そこで本研究では制御対象であるマルチコプターの運動モデル構成のために回転アーム装置を用いてプロペラ特性のモデリング手法を開発した。

また外乱抑制問題としてリセット積分器を外部信号発生器とした場合のサーボ系設計問題について研究を行った。既存の結果ではフィードフォワード入力を利用した2自由度サーボ系の設計が議論されていたが、予め制御対象の定常ゲインの情報を必要とするため制御対象が定常ゲイン変動を持つ場合外乱抑圧が十分に行えない欠点が存在した。そこで本研究では内部モデル原理に基づき制御器にリセット積分器を導入し、適当なりセット則を導入することでロバストな外乱抑圧が可能なりセットサーボ系が構成可能であることを確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Yuto Itoh and Atsushi Satoh	4. 巻 -
2. 論文標題 Modeling and Numerical Investigation of Aerodynamic Characteristics of a Propeller Circling on a Whirling Arm	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Transactions of the JSASS	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 渥美 秋, 佐藤 淳
2. 発表標題 状態依存イベント駆動型サンプル値フィードバックシステムの漸近安定化
3. 学会等名 計測自動制御学会 東北支部 第315回研究集会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 平塚雄斗, 伊深恭平, 佐藤 淳
2. 発表標題 出力フィードバック型リセットシステムのための新しいL2安定条件の保守性の評価
3. 学会等名 計測自動制御学会 東北支部 第322回研究集会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Atsushi Satoh, Masanao Watanabe, Koichi Hozumi, Akira Watanabe
2. 発表標題 ENDURANCE ANALYSIS OF BATTERY-POWERED MULTICOPTERS: DERIVATION OF PROPER CUT-OFF VOLTAGE USING DC MOTOR MODEL
3. 学会等名 32nd ICAS Congress (ICAS2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuto Itoh and Atsushi Satoh
2. 発表標題 ANALYSIS OF AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF PROPELLERS AT LOW ADVANCE RATIO USING A WHIRLING ARM
3. 学会等名 32nd ICAS Congress (ICAS2021) (国際学会)
4. 発表年 2021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
---------	---------