〈特別研究課題〉	都市環境メンテナンスに資する垂直離着陸
	無人航空機のセキュアフライトコントロール
助成研究者	名古屋大学 原 進



# 都市環境メンテナンスに資する垂直離着陸 無人航空機のセキュアフライトコントロール 原 進 (名古屋大学)

# Secure Flight Control of VTOL (Vertical Takeoff and Landing) -type UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) for Maintenance of Urban Environment

Susumu Hara (Nagoya University)

### Abstract :

For urban environment maintenance in both normal and emergency (e.g., at the time of disaster) periods, the use of UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) is very important from the viewpoint of efficiency and safety of the maintenance. Especially, VTOL (Vertical Takeoff and Landing)-type UAVs outdoes general fixed-wing aircraft because they do not need a long runway and are easy to land on narrow spaces. However, the flight efficiency of conventional VTOL-type UAVs has not been fully addressed. In order to realize their secure flight control, this paper discusses the following two topics. The first one is the application of the battery management system (BMS) recently developed in the electric vehicles (EVs) to Multicopter UAVs. The effectiveness of the use of highly accurate battery information based on BMS is described by simulations and experiments. The other one is the proposal of a novel stability evaluation method for nonlinear systems such as Quad Tilt-Wing (QTW) VTOL aircraft. For this purpose, this section introduces the scheme of the region of attraction (ROA) and introduces some ROA based optimization methods for aircraft design parameters, feedback controller design parameters, and simultaneous design of aircraft and feedback controller designs.

#### 1. はじめに

ドローンの急速な普及とともに、平常時のインフラ施設管理から災害発生時など緊急時の状況調 査に至るまで、大都市環境の常時/非常時メンテナンスへの無人航空機(UAVs: Unmanned Aerial Vehicles)の応用が模索されている。特に、長い滑走路を必要とせずに飛び立つことが可能で、狭 いエリアへの着陸が可能な垂直離着陸機(VTOL: Vertical Takeoff and Landing-type UAVs)は大都 市環境のメンテナンスには好都合である。これに該当するVTOL機としては、良く知られたマルチ コプター型のドローンから、翼やプロペラの機構を回転することで垂直離着陸と水平飛行を両立さ せるQTW (Quad Tilt-Wing) 機などが知られている[1]。

ところが、例えば現在のマルチコプター型のドローンはその安全を保守的な運用で確保してお り、搭載しているバッテリの能力などから考慮しても十分にその性能を発揮できていない。さら に、高速性や運搬性能等の観点からはQTW機の方が有利であるが、これは特性が複雑な非線形シ ステムであり、垂直離着陸と水平飛行間の両モードを両立するのに必要な(モード遷移時を始めと した)安定性確保はこれまで試行錯誤的に考えられてきている。ゆえに、VTOL型UAVsを安全に 効率良く運用するセキュアフライトコントロールを実現するためには、新しい制御システム技術の 導入が必要である。

そこで、本研究では上記のような技術導入を目指し、具体的に次の2種類の課題の解決を図った。第1の課題は、安全を確保しつつ性能を発揮するために最近研究され始めたバッテリの数理モデル化技術を発展させて、マルチコプター型ドローンのバッテリマネジメントを考慮した飛行制御法を検討し、シミュレーションと実験によりその有効性を明らかにする。本課題については、これまで慶應義塾大学の足立らが電気自動車の分野でバッテリの数理モデル化と状態推定に関する研究を進めているが[2]、フライトの安全性を前提としたモデル化と運動制御の連携までは考えられていなかった。第2の課題は、複雑な非線形システムの安定性を保証するために吸引領域の概念を導入し、かつそれを実用的な計算量で安定性の保証を図る手法を導入する。本手法により、機体の設計パラメータないしはフィードバック制御系のパラメータ最適化、もしくは機体構造とフィードバック制御系の両者それぞれに関わるパラメータの同時最適化などが可能になると考えられる。本課題については、例えば、従来のQTW機における垂直/水平飛行のモード遷移に試行錯誤的に古典的ゲインスケジューリングを適用しながらフィードバック制御系を設計することと比較して、系統的な設計が可能となり、セキュアフライトの実現に資するものと期待できる。

#### 2. マルチコプター型ドローンのバッテリマネジメントを考慮した飛行制御法

#### 2.1 バッテリの数理モデル化

マルチコプター型ドローンの活用が近年著しく注目されている。しかしながら、ネックはその連 続飛行時間・距離である。通常のバッテリを搭載するドローンでは、航続能力の向上を図るための バッテリの増設が即機体重量の増加、搭載可能ペイロードの減少につながる。これまで、ハード ウェアの改良、例えばエネルギー密度が高まる内燃機関を動力源としたドローンの開発も行われて きた[3]。ただし、都市部を飛行するドローンについては今後もバッテリとモータを駆動系とした ドローンが主流であろう。その場合、従来よりもバッテリの状態をきちんとマネジメントし、 SOC (State of Charge、充電状態)をできる限り正確に推定し、安全飛行に支障のない範囲で限度 まで消費することが航続能力向上のためには避けられない。言わば、ソフトウェアによる改良が重 要である。

SOCとは、バッテリの電気容量に対して、充電している電気量を比率で表したものであり、使 用後の電気容量をパーセンテージで表現できる大事なパラメータである。SOCを推定するための 従来の手法としては、(1)端子電圧計測による推定法や(2)クーロンカウント(電流積算)法が知られ ている。(1)は最も簡易な方法で、事前に調べておいた放電曲線に基づいて、現在の端子電圧から 放電曲線上のどの状態にあるのかを判定してSOCを推定する方法である。多くのUAVで適用され てきたが、ある理想的な条件でないと十分正確な推定ができない。(2)は式(1)に基づいて電流を積 算してSOCを推定する方法であるが、一度何らかの誤差が乗ってしまうと修正ができないのがこ の方法の弱点である。ここで、式(1)中のtは時間、toは初期時刻、iは電流を意味する。

$$\operatorname{SOC}(t) = \operatorname{SOC}(t_0) + \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau$$
<sup>(1)</sup>

簡易に充電容量を推定する従来法の場合、推定精度が不十分であり、結果として保守的な運用に 頼らざるを得ず、まだ飛行できるのにも関わらず無駄に充電を繰り返すことになっていた。ここで は、電気自動車の分野における最近の研究に基づいた数理モデルに基づく推定法をドローンのため に導入する。具体的には、バッテリを3次フォスター回路で近似できるとし、次の線形システムと してモデル化する[2]:

$$\frac{d}{dt}\boldsymbol{x}(t) = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{b}\boldsymbol{u}(t)$$
<sup>(2)</sup>

$$\boldsymbol{x}(t) = \begin{bmatrix} \text{SOC}(t) & v_1(t) & v_2(t) & v_3(t) \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$
(3)

$$y(t) = f_{OCV}(SOC(t)) + \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{x}(t) + R_0 u(t)$$
(4)

$$A = \text{diag} \left( 0 \quad -\frac{1}{C_1 R_1} \quad -\frac{1}{C_2 R_2} \quad -\frac{1}{C_3 R_3} \right)$$
(5)

$$\boldsymbol{b} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\text{FCC}} & \frac{1}{C_1} & \frac{1}{C_2} & \frac{1}{C_3} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$
(6)

$$C_l = \frac{C_d}{2}, \quad R_l = \frac{8R_d}{(2l-1)^2 \pi^2}, \quad l = 1, 2, 3$$
 (7)

$$\boldsymbol{\theta} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{R}_0 & \boldsymbol{R}_d & \boldsymbol{C}_d & \boldsymbol{\mathrm{FCC}} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$
(8)

ただし、 $R_i$ 、 $C_i$  (i = 0, 1, 2, 3)は3次フォスター回路を構成する抵抗要素[ $\Omega$ ]とコンデンサ要素[F]を 意味し、 $v_i$  (i = 1, 2, 3)は各コンデンサでの電圧降下[V]、FCCは満充電容量[Ah]を意味する。 $R_d$ 、 $C_d$ はそれぞれ拡散抵抗[ $\Omega$ ]と拡散容量[F]である。上記モデルと、オブザーバ(カルマンフィルタ)など の何らかのフィードバック修正機構を組み合わせることにより、(2)の方法などと比較して格段に 誤差の小さい推定が可能となる。

#### 2.2 バッテリの数理モデルに基づいた推定

バッテリの数理モデルに基づいた状態推定にはSOC-OCV曲線を用いる。OCVとは開回路電圧の ことであり、この曲線は出力電流比やバッテリ温度などに依存しない。図1がSOC-OCV曲線の一 例に相当する。推定のための手順は次のようになる。最初に微小電流での放電試験が必要であり、 SOC-OCV曲線を実験的に電流と電圧の応答から取得する。SOCはクーロンカウント法によって求 める。そして、OCVは出力電圧で近似して求める。SOC-OCV曲線は以下の式で表現することがで きる。

$$f_{\text{OCV}}\left(\text{SOC}(t)\right) = E^0 + k_1 \ln\left(\text{SOC}(t)\right) + k_2 \ln\left(1 - \text{SOC}(t)\right) - \frac{k_3}{\text{SOC}(t)} - k_4 \text{SOC}(t) \quad (9)$$

ここで、 $E^0$ ,  $k_i$  (i = 1, ..., 4) は未知パラメータであり、実験データに基づいて最小二乗法などを用いて推定される。その結果を用いて、図1に示すSOC-OCV曲線が決定される。次に、バッテリと推定パラメータの調整を行う。この段階は推定ロジックにより異なるが、本節ではこの推定ロジックとしてUKF (Unscented Kalman Filter)を選んだ。UKFは式(8)の $\theta$ について、実験的に得られたデータを用い、SOCと内部バッテリパラメータ両者の同時推定を可能にする。

#### 2.3 実験による考察

実験による結果を図2~4に示す。現在のほとんどのUAVは電流センサを持っていないため、シ ステム入力を生成するためにモータの回転速度とエネルギー消費の関係により計算される推定電流 を用いる。その関係式を式(10)で示す:

$$I = f_{\text{current}}(\omega) = a_1 \omega^3 + a_2 \omega^3 + a_3 \omega + a_4 \tag{10}$$

提案手法でのSOC推定値の精度を確認するために、実際のSOC値との比較を実施した。実際の SOC値は低ノイズ電流センサのデータを用いたクーロンカウント法により求めた。実験結果を見 ると、数理モデルに基づいたSOC推定法は実際のSOC値履歴と比較して遜色ない結果を示してい る。図3の飛行開始から10分経過した状態の推定値に注目し比較してみると、従来手法である終端 電圧から推定したSOC値が15%未満となる際にも、提案手法である数理モデルに基づき推定した SOC値は50%以上を示している。このように、本提案手法を用いることによって高精度なバッテ リ推定が可能となり、この情報を用いてバッテリを有効に活用することによって、UAVの飛行距 離を拡張することが期待できる。



#### 3. 非線形システムにおける吸引領域の概念に基づく最適化とQTW機への応用

一般に非線形システムの漸近安定な平衡点の近傍には安定な領域(吸引領域: Region of Attraction, RoA、図5)が存在し、非線形システムの安定性を評価する指標として吸引領域が有用 であることは知られている[4]。吸引領域を厳密に推定する方法は、モンテカルロ法に基づいた数 値計算によるもの[4]と、リアプノフ関数に基づいた解析的なもの[5, 6]の二つに大別される。しか し、モンテカルロ法は計算量と計算精度がトレードオフの関係を持ち、リアプノフ関数に基づいた 方法は対象モデルの次数の増加に応じて半正定値計画問題の行列の次元が非常に大きくなるため、 どちらも計算負荷が非常に大きくなりやすい。イタレーションを必要とするシステムの設計におい て、計算負荷は非常に大きな問題であり、吸引領域を評価し、設計することはその計算負荷の高さ からこれまであまり行われてこなかった。特に、対象が不安定な非線形システムであった場合は、 安定性を評価する代表的な指標が他に無く、複数の制御則を設計したなどの場合、制御則の選択は 設計者の熟練によるところが大きかった。

この問題に対し、堀部はモンテカルロ法に二分法を組み合わせることで計算量を低減する方法を 提案した[7]。この手法は従来のモンテカルロ法ほど形状を正確に推定することはできないが、そ れほど計算量を要せず、従来のモンテカルロ法と同様にその内部が安定領域である信頼度を測るこ とができ、数値シミュレーションが行えればどのような系でも適用できるという特徴がある。この 提案により、これまでは計算負荷の都合上吸引領域に基づいた評価を利用した設計を行うことが難 しかったシステムに対しても、実用的な計算時間での安定性評価が可能になり、システム設計へ利 用する敷居は下がった。この手法を構造設計へ適用する試みについて著者らは文献[8]で発表した。 また、制御則の設計に関するものについては文献[9]で発表している。平衡点に最も近い不安定点 を探索し、一つの数値の形で安定性を評価するこの手法は、例えば航空機のような、不安定となる ことが致命的な制御対象においては非常に有効で、その制御則の有効性の程度の差を比較的短時間 で知ることができる。

文献[9]では、このモンテカルロ法と二分法を組み合わせた手法について、その制御系選択へ適 用する試みと有効性の確認のため、図6に示すような不安定な非線形系の一つであるQTW機[1]を 取り上げ、その制御系設計について述べている。さらに、著者らは現在、二乗和多項式を用いて RoAを求め、安定性評価に活かす手法を研究している。この成果については現在、論文投稿を準備 している段階であり、具体的な結果については別の機会に公表予定である。



図5. 吸引領域: Region of Attraction, RoA



# 4. おわりに

本研究では、大都市環境の常時/非常時メンテナンスへの無人航空機(UAVs: Unmanned Aerial Vehicles)の応用を念頭に、そのセキュアフライトコントロールを実現するための課題について検討した。具体的には、マルチコプター型ドローンのバッテリマネジメントを考慮した飛行制御法と非線形システムにおける吸引領域の概念に基づく最適化とQTW機への応用の2種類の課題であり、それぞれ数理モデルに基づくバッテリマネジメントを導入すること、ならびに吸引領域の概念に基づく最適化問題を実用的な計算量で解くための方法論を導入することを試みた。一部の有効性について、シミュレーションや実験により明らかにした。

最後に、本研究は公益財団法人日比科学技術振興財団平成29年度研究開発助成(特別研究課題) 「都市環境のメンテナンスに資する垂直離着陸無人航空機のセキュアフライトコントロール」の支援を受けた実施されたことを記し、関係各位に謝意を表する。

#### 参考文献

- [1] 村岡浩治, "先進的形態を有する垂直離着陸無人航空機の研究", 日本リモートセンシング学会誌, 29, 4 (2009), pp. 579-585.
- [2] 足立修一, 廣田幸嗣, 押上勝憲, 馬場厚志, 丸田一郎, 三原輝儀, バッテリマネジメント工学 電池 の仕組みから状態推定まで, (2015), 東京電機大学出版局.
- [3] B. Ozturk, M. Burton, O. Zarse, W. Hoburg, M. Drela and J. Hansman, "Design of an Unmanned Aerial Vehicle for Long-Endurance Communication Support", *Proceedings of the 18th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference*, (2017), AIAA-2017-4148.
- [4] A. R. Armiyoon and C. Q. Wu, "A Novel Method to Identify Boundaries of Basins of Attraction in a Dynamical System Using Lyapunov Exponents and Monte Carlo Techniques", *Nonlinear Dynamics*, 79, 1 (2015), pp. 275-293.
- [5] A. I. Zecevic and D. D. Siljak, "Estimating the Region of Attraction for Large-Scale Systems with Uncertainties", *Automatica*, 46, 2 (2010), pp. 445-451.
- [6] F. Amato, C. Cosentino and A. Merola, "On the Region of Attraction of Nonlinear Quadratic Systems", Automatica, 43, 12 (2007), pp. 2119-2123.

- [7] 堀部貴雅, "吸引領域に基づいた非線形不安定系に対するシステムパラメータ最適化", 平成28年 度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会講演論文集, (2016), A2-5.
- [8] 中村潤平, 堀部貴雅, 原進, 椿野大輔, "吸引領域の定量的評価に基づくQuad Tilt-Wing機の設計 パラメータ最適化", 第53回日本航空宇宙学会中部・関西支部合同秋期大会講演論文集, (2016), D10.
- [9] 原進,永松恒,中村潤平,堀部貴雅,椿野大輔,"非線形システムに対する制御則選択のための吸引領 域に基づく定量的安定性評価とそのUAVへの適用",日本航空宇宙学会論文集,65,6 (2017), pp. 251-257.

# 本研究に関する業績

- [A] Koya KUWAMURA and Susumu HARA, "Development of an Integrated Control System of Battery and Flight Maneuver for UAVs", Proceedings of the 24th International Conference on Electrical Engineering 2018 (ICEE 2018), (2018), Paper ID G5-1228.
- [B] Koya KUWAMURA and Susumu HARA, "Effective Battery Management System for Unmanned Aerial Vehicles", Proceedings of the 4th IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON 2018), (2018), Paper ID V3-4.
- [C] Jumpei NAKAMURA, Takamasa HORIBE, Susumu HARA, Daisuke TSUBAKINO, Kohei YAMAGUCHI and Hisashi NAGAMATSU, "Quantitative Evaluation of Quad Tilt-Wing Aircraft's Attitude Stability Using Region of Attraction Estimation via Sum of Square", Proceedings of the 2017 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT 2017), (2017), pp. 1106-1113.