

《様式B》

研究テーマ 「垂直離着陸型固定翼ドローンの低燃費高安定飛行を可能にする自律制御システムの開発」

研究責任者 所属機関名 中部大学

官職又は役職 教授

氏名 棚橋 美治 メールアドレス tanahashi@isc.chubu.ac.jp

共同研究者-1 所属機関名 (株)ゼノクロス航空宇宙システム

官職又は役職 代表

氏名 満武 勝嗣

共同研究者-2 所属機関名 エクストリームコンポジットジャパン

官職又は役職 代表

氏名 角屋 守

(令和2年度募集) 第33回 助成研究 完了報告書

1. 実施内容および成果ならびに今後予想される効果の概要

- (1) 自律制御則作成：(株)ゼノクロス航空宇宙システム製 HILS (Hardware In the Loop Simulation; 飛行で使用する制御装置を使ったリアルタイムシミュレーションがパソコンで模擬出来る装置)を用いたフライトシミュレーションにより、自律制御則を作成した。  
(図 1.1) 評価しやすい PID 制御を用い、高度制御、ピッチ角制御、方位角制御等における制御パラメータを調整した。マルチコプタ制御においては、固定翼制御を、前後速度・ピッチ角制御→サイクリック（縦方向）、左右速度・バンク角制御→サイクリック（横方向）、方位角→ロータ回転数、高度制御→コレクティブ、スロットルに置換えた。
- (2) VTOL 模型試作および飛行実験：エクストリームコンポジットジャパンにより市販の固定翼模型飛行機に垂直離着陸を可能にするプロペラ 4 基を X 字型に配置し、機体に装着した。(図 1.2) 市販の飛行制御装置を用いた手動操縦によるフライトデモでは、フライトモードの瞬時切換により飛行操縦可能な見通しを得た。
- (3) 固定翼制御則検証：固定翼機のための飛行制御方法の検討を、HILS を用いたフライトシミュレーションにより行った。(表 1、図 1.3) 制御パラメータの調整により、指令値と機体姿勢の応答と比較した結果、良好な一致を示し、飛行制御則の妥当性を確認した。
- (4) 固定翼模型飛行実験：安定性・操縦性の比較的良好な市販の固定翼機を用い、これに HILS を装着して飛行実験を行い、飛行制御則の安定性・操縦性を手動操縦により確認した。(図 1.4) 予め想定した飛行経路に対し、横風等の影響はあるものの概ね安定的に飛行可能な見通しを得た。
- (5) VTOL 自律制御則の製作および検証：HILS の製作において、HILS の環境構築、VTOL のフライトシミュレータおよび自律制御プログラムの製作、自律制御プログラムのシミュレーション内での検証を行った。(2 項、実施内容および成果の説明参照)
- (6) 今後予想される効果：本研究は、VTOL の固定翼モードとマルチコプタモードを瞬時に切替えるものであり、今後、不安定な遷移領域を HILS に組み込み、制御の最適化を図る。また、飛行実験により、マルチコプタの位置制御を含めたフライトエンベロープおよびモード切替の最適化を図る。  
今後、これらの成果を活かし、被災地への緊急輸送をはじめ、状況監視による迅速な情報提供に供する等、実用化に資することが期待される。

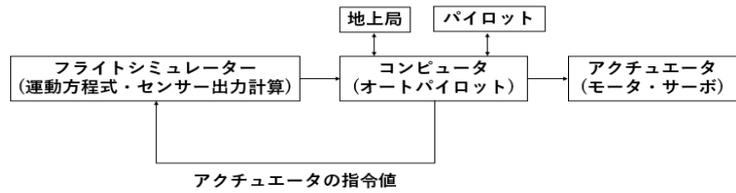


図 1.1 HILS 及びシミュレーション



図 1.2 VTOL 試作模型

表 1 各種パラメータ

|        | $KP$ | $KI$  | $KD$ |
|--------|------|-------|------|
| 高度制御   | 0.2  | 0.02  |      |
| ピッチ角制御 | -1.4 | -0.14 | 1.0  |
| 方位角制御  | 0.3  | 0.03  |      |
| バンク角制御 | 1.3  | 0.13  | -1.3 |
| 速度制御   | 3.0  | 0.3   |      |
| 横滑り制御  | -1.0 | -0.1  | 1.0  |

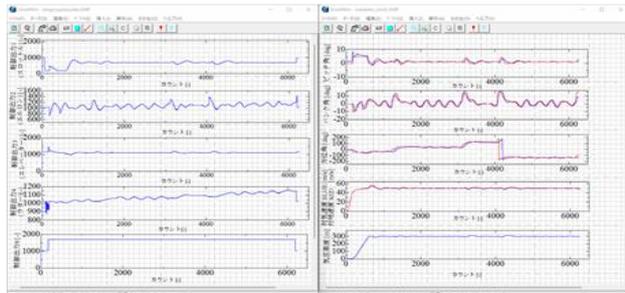


図 1.3 フライトシミュレーション結果例  
(左:制御出力値,右:姿勢角[赤:指令値, 青:機体姿勢])



図 1.4.1 飛行実験用固定翼機

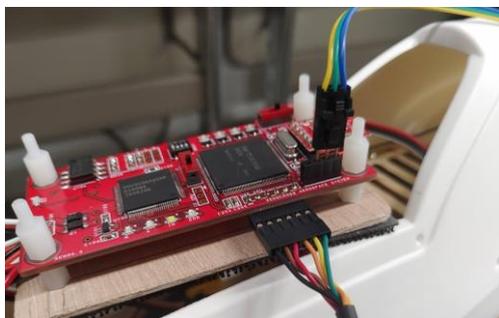


図 1.4.2 HILS の機体組込状況

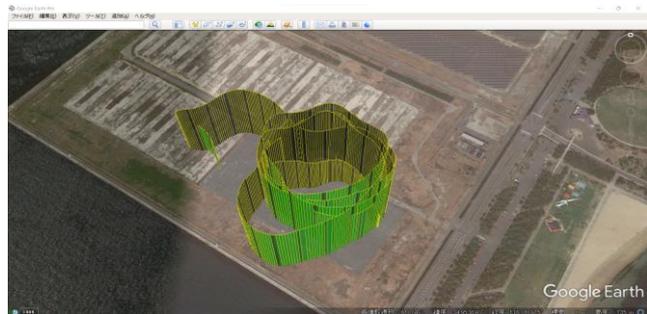


図 1.4.3 飛行実験による飛行経路の確認

## 2. 実施内容および成果の説明

VTOL 式無人機は、滑走路を必要とせず、マルチコプタに比べ、固定翼の揚力を活かしているため、水平飛行では、自重を支えるための推力が不要であり、航続時間および航続距離が長い。しかし、VTOL におけるマルチコプタモードから固定翼モードまたはその逆の時、遷移領域を介するため不安定になりやすく制御が困難になる。

この問題に対しては、HILS<sup>(1)</sup>と呼ばれるプログラム検証を行うフライトシミュレータを使用したリアルタイムシミュレーションの構築を行うことで解決を図る。今回は、HILS のシミュレータ部分を正規品のマイクロソフト フライトシミュレータ X を使用した自律制御プログラムの検証、VTOL を対象としたフライトシミュレータの製作及びこれを使用した HILS の構築を行った。

## 2.1 HILS

HILS でのフライトシミュレーションの検証風景を図 2.1 に示す。



図 2.1 HILS の検証風景

## 2.2 自律制御プログラムの作成

### 2.2.1 マイクロソフトフライトシミュレータ X を使用した自律制御プログラムの検証

#### (1)ゼノクロス航空宇宙システム提供プログラム

制御装置とマイクロソフトフライトシミュレータの接続部分など通信に関する箇所はゼノクロス航空宇宙システムにより提供された。プログラムの環境は、HEW(High-performance Embedded Workshop)である。

#### (2)自律制御プログラムの製作方法とゲインの調整方法

以下では実際に製作した自律制御プログラムの内容とゲインの調整方法について示す。今回自律制御の方法としては、古典制御の PID 制御または PI 制御を採用した。また、行った制御は、高度制御、ピッチ角制御、方位角制御、バンク角制御、速度制御、横滑り角制御である。ゲインの調整方法は、比例ゲイン 1 に対し、積分ゲインは 0.1 倍、微分ゲインは 1 倍の割合で調整し、その後機体の動きやデバックしたデータからそれぞれのゲインを調整した。

#### (3)高度制御・ピッチ角制御

ここでは、高度制御とピッチ角制御を示す。高度制御は、目標高度と現在高度の差分を使用した PI 制御とした。ピッチ角制御は、高度制御結果をピッチ角の目標値とし現在のピッチ角との差分を使った PID 制御を使用した。シミュレーション結果を図 2.2 に示す。

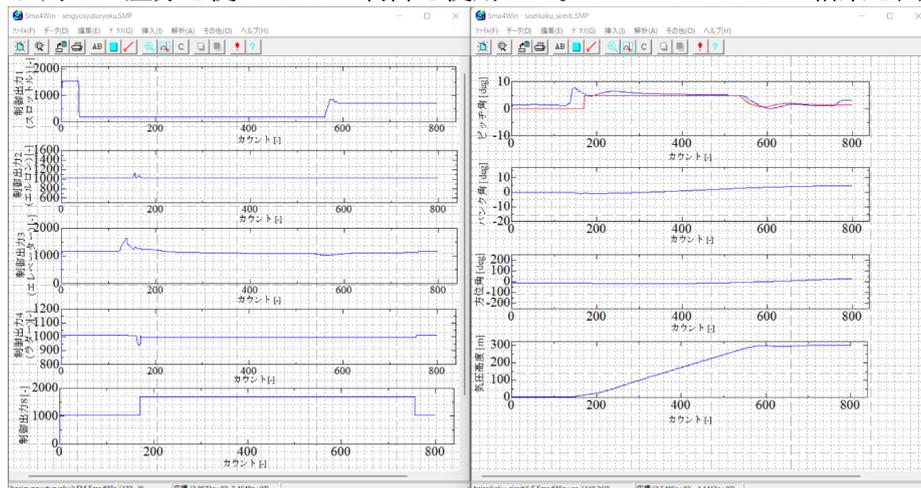


図 2.2 高度制御・ピッチ角制御の結果 (赤線：目標値 青線：モデル機体の実際の値)

#### (4)方位角制御・バンク角制御

ここでは方位角制御・バンク角制御について示す。方位角制御は、Pure Pursuit 法により求めた角度を目標値とし、現在の方位角との差分を使用した PI 制御とした。Pure Pursuit 法については図 2.3 に示す。バンク角制御は、方位角制御の制御結果を目標値とし、現在のバンク角の差分を使用した PID 制御である。

シミュレーション結果を図 2.4 に、地上局ソフトウェアでの飛行経路を図 2.5 に示す。

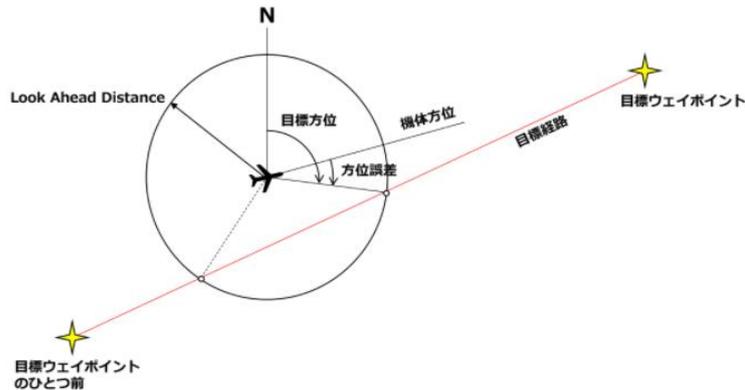


図 2.3 Pure Pursuit 法<sup>(6)</sup>

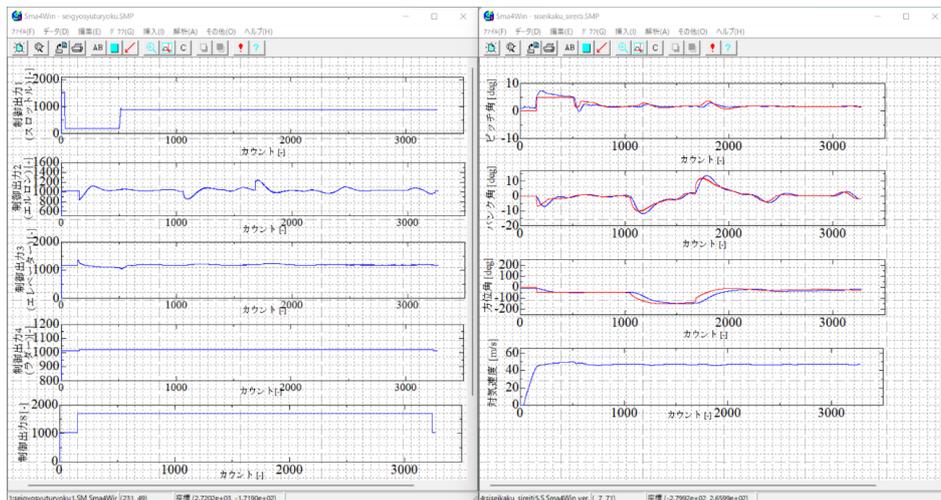


図 2.4 方位角制御・バンク角制御の結果(赤線：目標値 青線：モデル機体の実際の値)

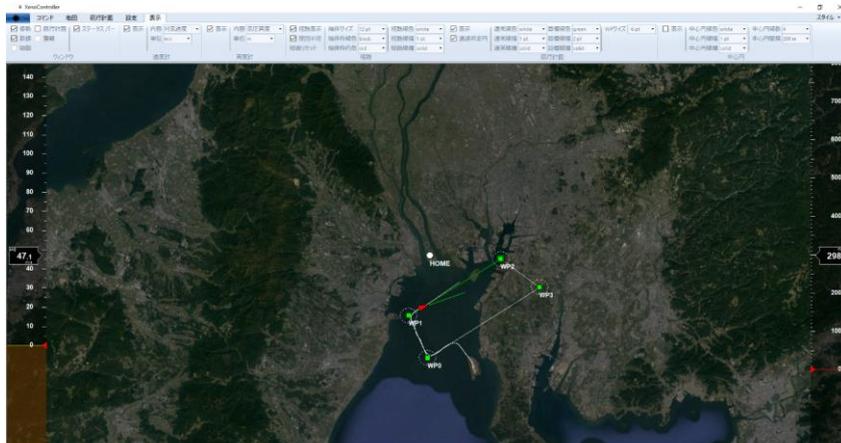


図 2.5 地上局ソフトウェアでのモデルの飛行経路

## (5)速度制御

ここでは速度制御について示す。速度制御では、目標対気速度をしていし、現在の対気速度との差分を使用したPI制御である。そのシミュレーション結果を図2.6に示す。

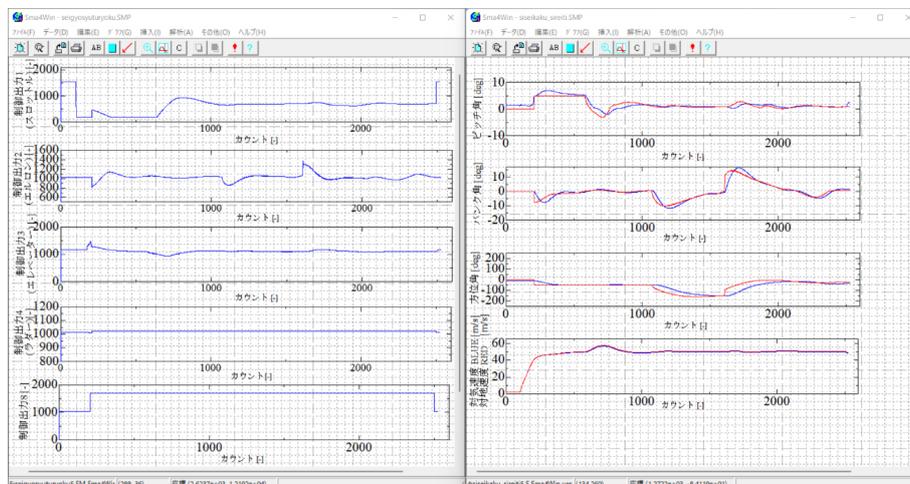


図 2.6 シミュレーション結果 (赤線：目標値 青線：モデル機体の実際の値)

## (6)横滑り角制御

ここでは、横滑り角制御について示す。横滑り角制御では、機体の横方向の加速度をゼロにするようなPID制御を行っている。シミュレーション結果を図2.7に示す。

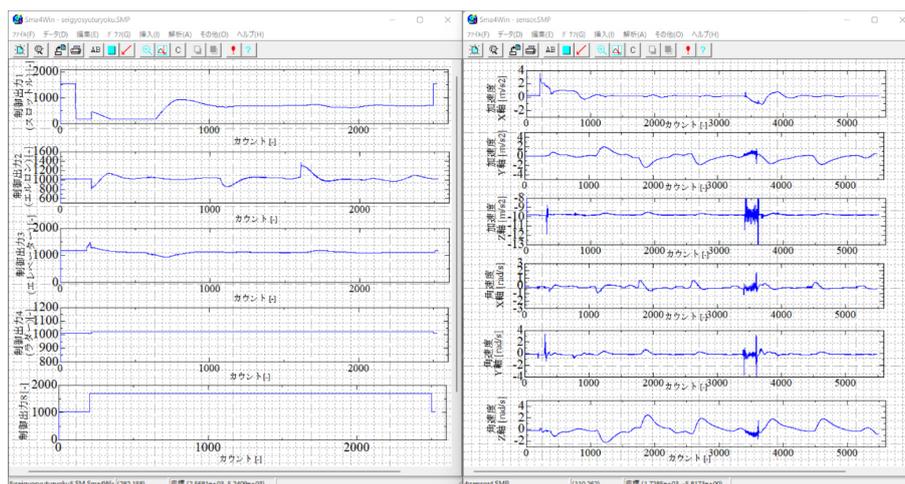


図 2.7 シミュレーション結果

## 2.2.2 VTOL を対象としたフライトシミュレータの製作

### (1) ゼノクロス航空宇宙システムによるプログラム

ゼノクロス航空宇宙システムから提供されたフライトシミュレータプログラムは、運動方程式や Excel にデータを保存するなどの部分を製作してもらい、空力計算と自律制御の部分は、自身で製作できるように空白となっている。プログラムの開発環境は、Visual Studio である。

### (2) フライトシミュレータ(固定翼)

ここでは、VTOL における固定翼モードを示す。固定翼モードでは、米空軍が開発した空力解析コード Digital Datcom で求めた結果を用いて空力計算を行っている。自律制御プログラムは、2.2.1 項で示したものと同等の方法を使用した。

図 2.8 は、シミュレーションを行った時のモデルの飛行経路を示したものである。

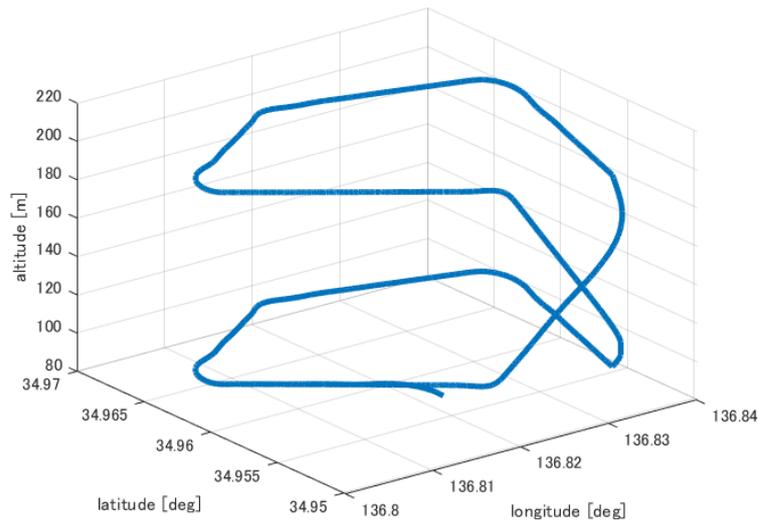


図 2.8 経路(固定翼)

### (3) フライトシミュレータ(マルチコプタ)

ここでは、VTOL のマルチコプタモードについて示す。このモードでは、上昇下降、前進、停止を行う。上昇下降では、固定翼モードと同様の方法で高度制御を行っている。その制御結果と下向きの速度の差分を使用した PI 制御を行い、4 つのモータの制御を行っている。前進と停止では、固定翼モードと同様の速度制御を行い、その結果を目標ピッチ角とし、現在のピッチ角との差分を使用した PI 制御を行った。その後、ピッチ角制御の結果をピッチ角方向の角速度の目標値とし、現在のピッチ角方向の角速度との差分を使用した PI 制御を行いモータの制御を行った。図 2.9 は、自律制御プログラムをまわした時のシミュレータ内のモデルの飛行経路を示したものである。

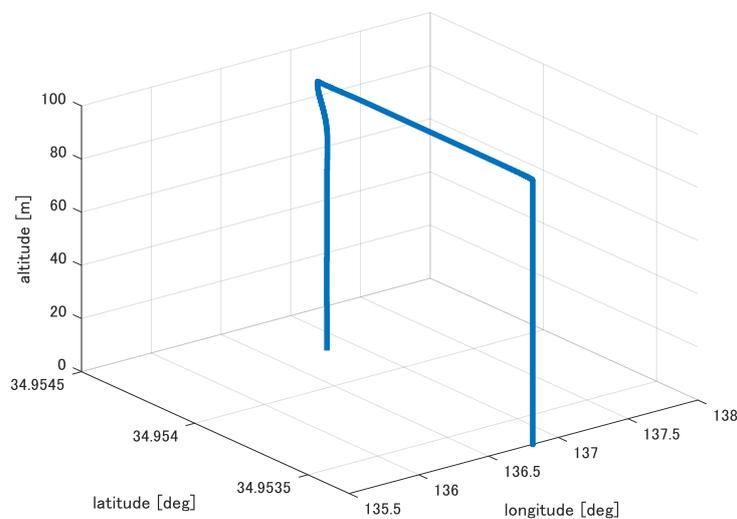


図 2.9 経路 (マルチコプタ)

### (4) VTOL のシミュレーション

2.2.2 項の(2),(3)で製作した固定翼モードとマルチコプタモードを合わせることで VTOL のシミュレーション及び VTOL の自律制御プログラムとした。

図 2.10 に、シミュレータ内のモデルの飛行経路を示す。

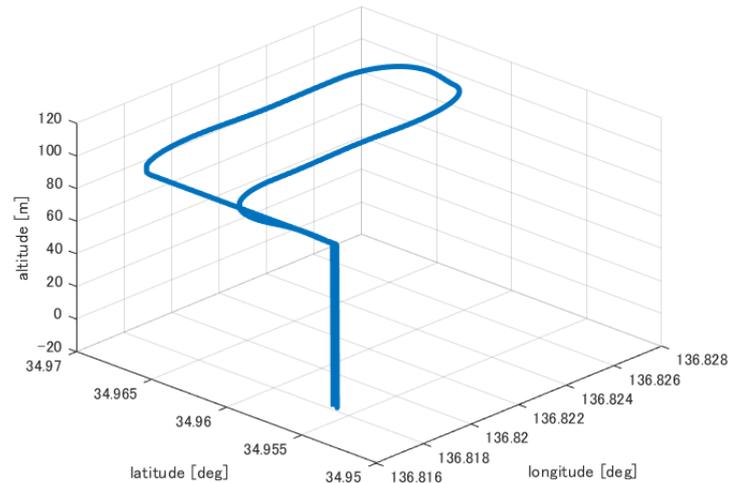


図 2.10 自律制御 (VTOL)

### 2.2.3 VTOL を対象とした HILS の構築

今までシミュレータと同じ環境下で自律制御プログラムを動かしていたが、HILS は、実際に搭載する制御装置で動かすため、2.2.2 項の(4)で示した Visual Studio で製作した自律制御プログラムを、2.2.1 項で示した自律制御プログラムと同様の環境下である HEW に移行した。

制御装置と Visual Studio で製作したフライトシミュレータの通信に関しては、ゼノクロス航空宇宙システムの製作による。

## 2.3 成果

前半は、固定翼モードにつき、(株)ゼノクロス航空宇宙システムから提供された HILS を用いて自律制御プログラムを作成し、フライトシミュレータ上で想定機体の飛行特性を評価した。

また、エクストリームコンポジットジャパンにより、市販の模型飛行機にマルチコプタを装着改造した VTOL 機を、市販の制御装置を用い、手動操縦により、マルチコプタモードから固定翼モードへの瞬時切換えの飛行実証を行った。

後半は、マルチコプタモードから固定翼モードへの移行を独自プログラムで出来る様、HILS の環境構築、VTOL のフライトシミュレータおよび自律制御プログラムの作成、自律制御プログラムのシミュレーション内での検証を行うことができた。

## 3 参考文献

- (1)江口弘文, “初めて学ぶ PID 制御の基礎”, 東京電気大学出版局, (2006).
- (2)満武勝嗣, “中部大学講義資料第 1 回目無人航空機と誘導制御装置の開発と HILS”, (2020).
- (3)満武勝嗣, “中部大学講義資料第 2 回目 HILS の操作方法説明、開発環境説明、ソフトウェアの書き込み”, (2020).
- (4)満武勝嗣, “中部大学講義資料第 3 回目固定翼航空機の操縦方法”, (2020).
- (5)満武勝嗣, “中部大学講義資料第 4 回目縦の制御則”, (2020).
- (6)満武勝嗣, “中部大学講義資料第 5 回目横・方向の誘導制御則”, (2020).
- (7)満武勝嗣, “中部大学講義資料第 6 回目プログラム実習”, (2020).
- (8)加藤寛一郎, 大屋昭男, 柄沢研治, “航空機力学入門”, 東京大学出版会,(1982).
- (9)AFFDL-TR-79-3032, “THE USAF STABILITY AND CONTROL DIGITAL DATCOM Volume I, Users Manual”, (2021).
- (10)野原健蔵, “ドローン工学入門モデリングから制御まで”, コロナ社, (2021).