

ARLISS2011 報告書

東京大学 中須賀研究室 APUS-11 チーム

1. 機体名・メンバー



Fig.1 メンバー紹介

⑦ ⑩ ⑪ ⑨ ③ ②
⑥ ⑤ ⑧ ① ④

[機体名] URANUS (Fig.2,3)

[指導教官] 中須賀真一

[リーダー] 尾崎直哉(①)

[メンバー] 木村元紀(②), 貞森友章(③), 岡田空馬(④), 浜島静香(⑤), 伊藤麻里(⑥), 石川晴基(⑦), 宮谷聡(⑧), 井上雄喜(⑨), 加藤宏基(⑩), 菊地建人(⑪)



Fig.2 URANUS 外観 1



Fig.3 URANUS 外観 2

2. 機体紹介

2. 1 ミッションステートメント

東京大学は4年前より3年間、TENRAIと呼ばれる全翼機を用いたフライバックに挑戦してきた。今回は、このTENRAIとは違う主・尾翼分離型の固定翼機 URANUS でフライバックによる目標地点への接近及び、機体に搭載したカメラを用いた飛行経路の動画の撮影を目指し、プロジェクトを進めることとした。ミッションステートメント及びサクセスクライテリアをそれぞれ Table.1, Table.2 に示し、ミッションシーケンスを Fig.1 に示す。

Table.1 ミッションステートメント

昨年度まで開発を行ってきた全翼機 TENRAI とは違う、一般的な航空機と同じく主・尾翼分離型の固定翼機 URANUS で以下のミッションを達成する。

- 尾翼に取り付けられたラダーにより飛行中の経路誘導を行い、予め指定された目標地点に到達する
- 機体に搭載したカメラを用いて上空から飛行経路の動画を撮影する
- 地上局で機体の位置を把握し、追尾を行う

“目標点への到達”はカムバックコンペティションに参加し、ゴール地点への誘導を行うことでの実証を目指す。

“飛行経路の動画の撮影”は機体に取り付けられた小型カメラにより撮影し、SDカードに保存された動画を確認する事とする。

“機体の追尾”については地上局を車に搭載して機体から送信される位置情報に基づき追尾を行い、機体からの位置情報が常に80%ダウンリンク出来ている事を目指す。

Table2. サクセスクライテリア

Minimum Success	<ul style="list-style-type: none">• 機体を回収する（着陸地点での位置情報を無線で取得する）• 放出後、安定飛行（5秒間ピッチ角を±15[deg/s]に維持）が出来るようにする• 動画を撮影する（途切れても構わない）
Full Success	<ul style="list-style-type: none">• 6秒に1回ペースでGPSのデータを無線で送り、80%（切り捨て）以上取得する• 目標地点から半径500m以内の円に入る• 動画を撮影する（少なくとも1分以上途切れずに撮影する）
Advanced Success	<ul style="list-style-type: none">• 飛行を体験する動画を作成する• 目標地点（ゼロ距離）を目指す

2. 2 機体構成

自律飛行型小型飛行機 URANUS は、従来のカンサット固定翼機の中でも最大級のサイズと重量を誇るプロペラ飛行機である。主翼のスパン長は 1200mm, 平均空力翼弦は 127mm, 重量は約 525g にも及び、滑空時は 15[m/s]以上で飛行するように設計されている。

構造としては、このような大きな主翼を収納するためには、蝶番のようなものを用いた折り畳み方式では無く、全体が潰れることによりコンパクトに収納出来ることが求められる。そのため、メジャーによるコンベックス構造（構造剛性で強化）の骨組みにポリプロピレンの膜を張ることにより、キャンバを持った翼を再現している。また、翼根は特に強度的に弱いため、折り畳み時に翼根での断面二次モーメントが小さくなりすぎないようにするために、大きなコンベックスの中に小さなコンベックスを入れたダブルコンベックス構造となっている。



Fig. 4 URANUS 骨組み



Fig. 5 URANUS 主翼外観

収納方法としては、片面に負担を小さくするロール巻き方式ではなく、翼を上空で早く展開出来るようにするために蛇腹折り方式を採用している (Fig.6, Fig. 7). そして、キャリアからスムーズに放出されるためにマジックテープによるベルトを用いて確実な展開を実現した。



Fig. 6 URANUS 尾翼



Fig. 7 URANUS OBC

2. 3 システムブロック図

システムブロック図を Fig. 8 に示している（信号の流れを色毎に分けている）。電子回路系は OBC(SH7144)を中心にセンサとして、GPS、ジャイロ、そしてアクチュエータとしてラダー・エレベーター制御用サーボモーターおよびプロペラ制御用ブラシレスモーター、そして地上局の通信用として MU-2、ミッション機器として小型カメラが搭載されている。当初は高度センサを取り付けて高度制御をする予定をしていたが、スケジュールと必要性を考え直し、取り外すこととなった。

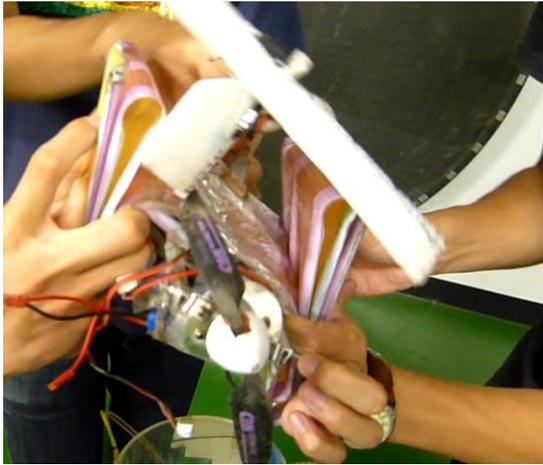


Fig. 8 URANUS 収納方法

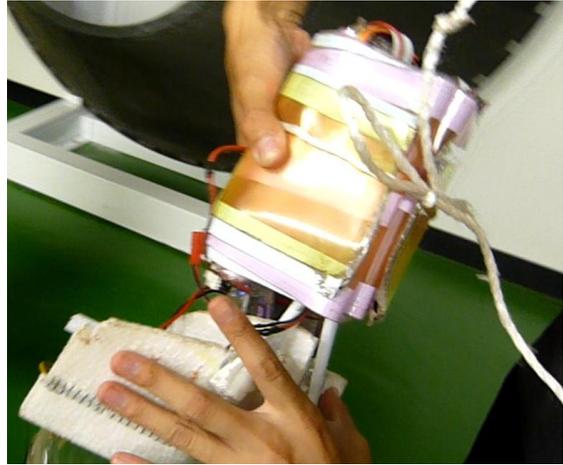


Fig. 9 URANUS 収納時外観

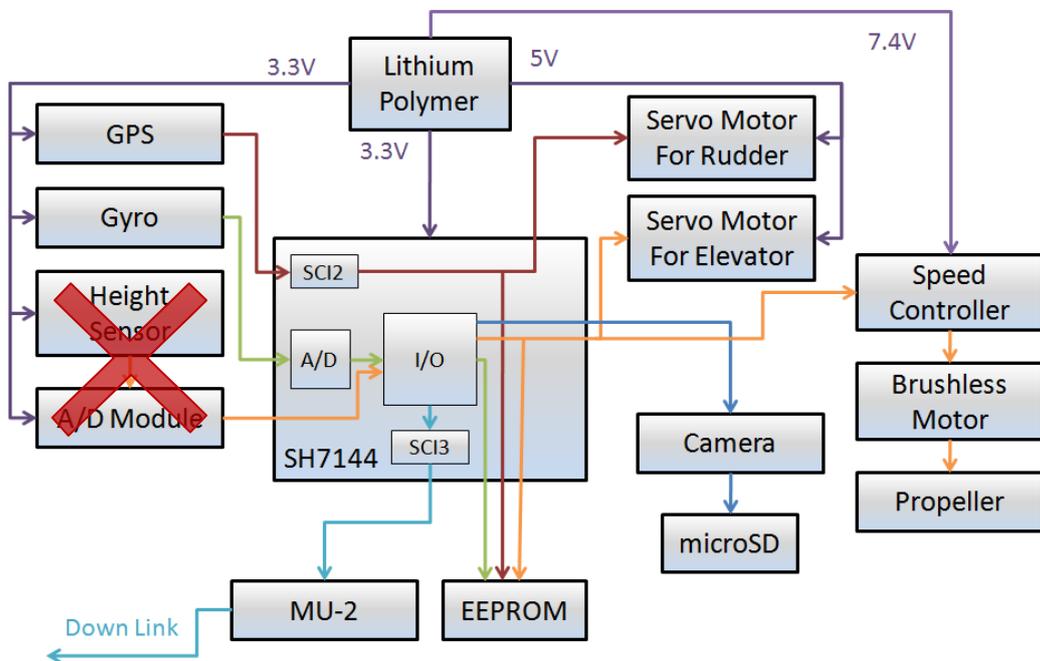


Fig. 10 System Block Diagram

2.4 地上局

機体を追尾して追いかけるために GPS と無線機(MU-2)を連携させて、PC 上のソフトウェアで解析を行う地上局システム(MUG CUP)を開発した。地上局ハードウェアとして Fig. 9, Fig.10 に示すように MU-2 を竹竿(1.5m 程度)の上端に、GPS をその下に取り付け、自動車の窓から竹竿を出してデータをダウンロードする。また、ダウンロードされたデータは Fig.11 に示す地上局ソフトウェアを用いて解析し、URANUS の飛行経路と地上局の軌跡をそれぞれ描画する形で追尾を行う。

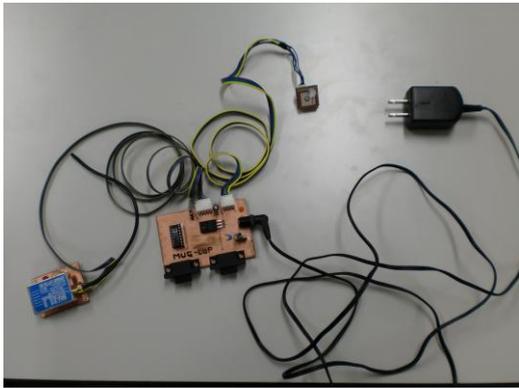


Fig. 11 地上局ハードウェア



Fig.12 地上局の様子



Fig.13 地上局ソフトウェア

2. 5 制御アルゴリズム

機体の制御はロール・ピッチ・ヨー方向制御から構成されている。

[ロール制御]

ロール方向の制御はジャイロから入力されるロール角速度に応じて、ラダー用サーボへ出力する制御である。尚、ロール制御はロール角速度がある程度大きな値になるまでは制御を行わない。

[ピッチ制御]

ピッチ方向の制御は予め決めておいたエレベーター角度をゼロ点とし、ピッチ方向ジャイロから入力されるピッチ角速度に応じて、エレベーター用サーボへ出力する制御である。

[ヨー制御]

ヨー方向は目的点への誘導制御となっており、GPS から出力される機体座標及び機体速度から目的点へと誘導する。機体速度ベクトルおよび目的点への位置ベクトルの角度を θ とし、その角度 θ が最小になるように誘導制御を行う。目的誘導アルゴリズムの概要を Fig.12 に示す。

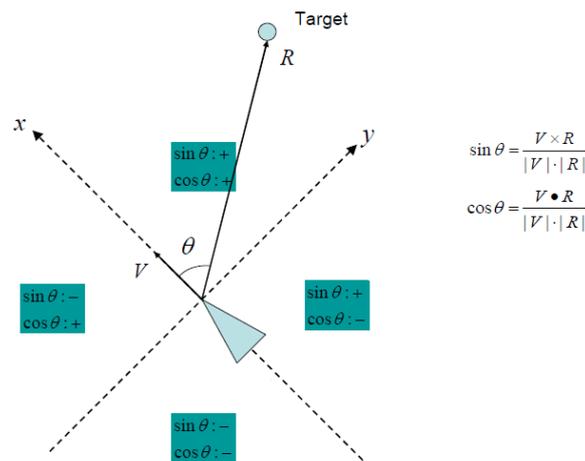


Fig.14 目的誘導アルゴリズム

2. 6 飛行試験

飛行機型カンサットは飛行試験の実施に困難を感じているチームが多いかと思われるが、我々のカンサットはその強度と失速速度の小ささのおかげで破損すること無くデータを取得することが可能であったため、学内や河原で数百回に渡る飛行試験により確実な滑空が可能となった。また、他大学の協力のもとで、気球試験を4度行い、キャリアからの正常放出・展開を確実に行う事も成功している。



Fig.15 飛行試験の様子

3. 結果

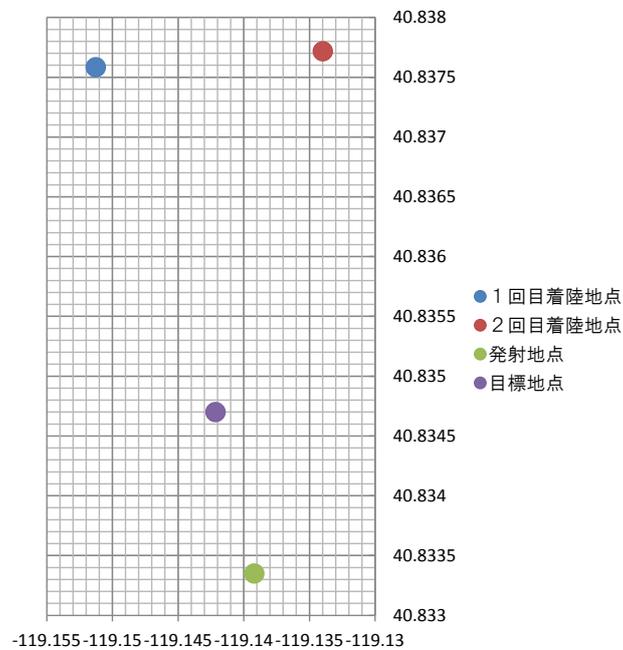


Fig. 16 着陸地点

[1回目の飛行]

結果： 1100m (N 40° 50.255', W119° 09.076')

制御： 確認出来ず

風向・風速： 良好

キャリアから正常放出・展開には成功したが、電源投入用マイクロスイッチの不具合により電源が入らずに無制御で降下してきた。その結果、ロール方向の不安定が原因で徐々にスパイラル状態に陥り、錐揉み状態で落ちてきている様子が目視で確認された。



Fig.17 1回目の飛行

対策としては、マイクロスイッチの見直しをすることにより電源を投入させ、そしてロール方向制御を行うことにより、スパイラルに陥らないように制御することが考えられ、この部分を見直して2回目の飛行へ取り組んだ。

また、カメラに関しては動画が撮影されているようだが、落下の衝撃（あるいは放出の衝撃）と同時にファイルのフッターが故障し、動画を復元することが出来なかった。

[2回目の飛行]

結果： 655m (N 40° 50.263', W119°08.039')

制御： 確認出来ず

風向・風速： 東方向に強風

1回目の反省を活かし、マイクロスイッチの改良を行い、翼の上面に取り付け、2つのスイッチがANDでONになっていたものを1つに減らし、確実な電源投入を目指した。

そして、今回は電源が投入され、数回ではあるがデータのダウンリンクにも成功した。しかし、GPSが十分な衛星数を取得できず、制御が確認出来なかった。回収後GPSを動作させてみると今までと同じ速さで衛星を取得する事が出来なかった。落下による衝撃でGPSが故障したとも考えられるが、機体の姿勢が不安定であったこともGPS取得失敗の原因となっているのではないかと考えられる。

一方、ジャイロセンサは機能し、ロール方向の安定制御が確認できた。放出直後ラダーゲインは0であったのだが、十分に時間がたったある点からラダー制御量が負の値を示す傾向が強くなった。そして、落下直前の状態を横軸に時間、縦軸にラダーゲインをとってグラフ化したものをFig.18に示す。放出直後、機体のロール角速度がロール安定制御の敷居値以下であったため、ロール制御が行われなかったのに対し、Fig.18に示すように時間が経つと共にロール角速度が増大し、安定制御が行われたという事を示していると予想出来る。

まとめると、GPSの不調により十分な衛星数を取得できるまでの間にロール不安定になってしまったため、GPS衛星を取得せずにスパイラル不安定のまま落ちてきたと予想される。



Fig.18 マイクロスイッチの改良



Fig.19 落下後の様子

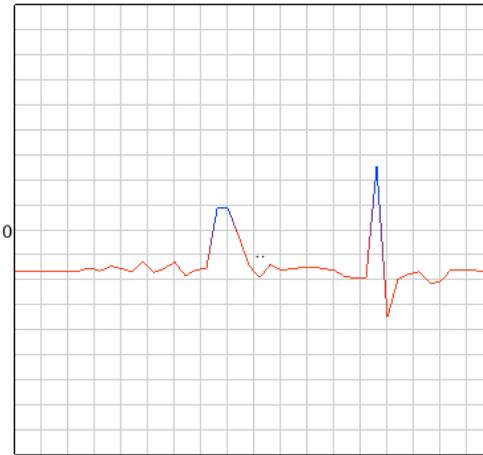


Fig.20 ラダーゲイン

また今回も、カメラに関しては動画が撮影されているようだが、落下の衝撃（あるいは放出の衝撃）と同時にファイルのフッターが故障し、動画を復元することが出来なかった。

4. 反省と課題

4. 1 プロジェクト総括

まずサクセスクライテリアの達成度を Table. 3 に示す。赤色が失敗，そして橙色が判断出来ないもの，紫色は途中で諦めた物である。全体的にサクセスクライテリアは失敗している。その一番の原因はプロジェクトに対する検討の甘さであるように思われる。

GPS は取得できることを前提として考えていたり，通信は 100%届くものと考えていたり，実際にどれぐらいの衛星数が取得できるか，その衛星数を達成するためには姿勢安定度がどれ程必要か，あるいは通信は距離に応じてどの程度届くのかという事をもう少しよく調べ，検討すべきだったように思う。

Table.3 Success Criteria Review

Minimum Success	<ul style="list-style-type: none">機体を回収する（着陸地点での位置情報を無線で取得する）放出後，安定飛行（5 秒間ピッチ角を$\pm 15[\text{deg/s}]$に維持）が出来るようにする動画を撮影する（途切れても構わない）
Full Success	<ul style="list-style-type: none">6 秒に 1 回ペースで GPS のデータを無線で送り，80%（切り捨て）以上取得する目標地点から半径 500m 以内の円に入る動画を撮影する（少なくとも 1 分以上途切れずに撮影する）
Advanced Success	<ul style="list-style-type: none">飛行を体験する動画を作成する目標地点（ゼロ距離）を目指す

4. 2 課題

今後固定翼タイプのコンサットを製作する人は是非参考にして欲しい。

まず，我々のコンサットの失敗の原因は姿勢の不安定（錐揉み状態）になることであったが，これを回避するためには①ロバスト性の高い最適制御を行うか②左右が完全に対称な飛行機を製作する必要があるだろう。また，これが実現すれば URANUS は安定して目標地点を目指せたのではないかと思う。具体的には，①に関しては各種安定微係数を概算して，状態方程式を推定してフィードバック制御を行うことだろう。また，②に関してはメジャーや EPP を折り曲げて作成する翼はロケットへの収納時に変形してしまうため，ヒンジを用いて完全に元に戻る翼を作成すべきだろう。

また，我々のコンサット URANUS は主翼の面積・アスペクト比を大きくすることにより失速速度・経路角を向上させ，飛行試験を行い易くした。しかし，それでもやはり固定翼機の試験は難しく，おそらく高度 100m の高さから落とさないと本番と同様の環境が再現出来ないだろうという結論に至った。ローバータイプのように何度も本番と同じ環境で実験をするためには，①地面に近いところまでパラシュートで落ちてきてプロペラで飛行する

ことが良いように考えられる，それ以外にグライダーとして飛行するなら，放出後どのような角度で落ちているかわからないため，どのような角度で落としても安定した姿勢に戻るために②非常に軽量化した固定翼機を設計する必要があるだろう。

そして，これは根本的な話であるが，固定翼機は，どのようなアルゴリズムで目標地点を目指すかを整理し直した方が良いだろうと思う。そもそも固定翼機は揚抗比がパラフォイルに比べてかなり大きいので，非常に遠くまで飛ぶことが可能である。しかし，ARLISSのロケットの放出地点と目標地点はそれほど大きな揚抗比が無くとも到達できる距離である。すなわち，放出地点からグライダーで目標地点を目指すためには，目標地点上空で螺旋を描きながら飛行する必要があるが，この場合旋回性能が非常に高い固定翼機を設計しなければいけないし，旋回性能が良いということは逆を言えば安定性が少し低いという事になるため，安定飛行が難しくなる。一方で，固定翼機の揚抗比の良さを活かしたアルゴリズムは十分に高度が低いところまで落ちてきて目標地点を目指すというものだろうけれども，これはプロペラ無しではリスクが高くなるため，プロペラを取り付けることが理想的だと思う。

5. 謝辞

今回 ARLISS プロジェクトを進めるに当たり，ロケットを打ち上げて頂いたエアロパックの方々，ARLISS 学生運用代表者の伊藤さん及び参加大学の皆さん，そしてご指導して下さいました中須賀先生，最後に毎日のように夜通し一緒に作業をした APUS-11 のメンバーに深く感謝を致します。