

ARLISS2024大会報告書

提出日：2024年10月19日

チーム情報

CanSatチーム名	東京都立大学 TMU NAVi
CanSatチーム 代表者情報	吉川 祥太郎 yoshikawa-shotaro@ed.tmu.ac.jp
UNISEC団体名	東京都立大学 宇宙システム研究室
UNISEC団体 学生代表	安平 浩義
責任教員	佐原 宏典 sahara@tmu.ac.jp, 042-585-8624
CanSatクラス	Open Class

メンバー

役割	氏名 (学年)
PM, 電装班	吉川 祥太郎 (B4)
電装班	今崎 愛斗 (B4)
電装班	類家 利英 (B4)
構造班	土田 耕平 (B4)

CanSatの製作目的・大会参加理由

ミッションステートメントの設定からシステム試験までの計画・実行・評価・改善を通してプロジェクトマネジメントを経験するとともに、人工衛星開発に必要な回路設計、CADの技術能力を向上させることがCanSat 製作の目的である。実際に手を動かし、独自に設定したミッション達成のため、開発から運用までを経験できるという本大会ならではの特色に強く魅かれ参加を決意した。

目次

第1章	ミッション定義	3
第1.1節	ミッションステートメント	3
第1.2節	ミッション内容	3
第1.3節	サクセスクライテリア	5
第2章	システム要求	6
第2.1節	レギュレーションを満たすためのシステム要求	6
第2.2節	ミッションを達成するためのシステム要求	7
第3章	システム試験項目の設定	8
第3.1節	レギュレーションを満たすためのシステム試験項目	8
第3.2節	ミッションを達成するためのシステム試験項目	9
第4章	システム仕様	10
第4.1節	機体概観	10
第4.2節	機体機構	11
第4.3節	搭載機器	12
第4.4節	機体内観	12
第4.5節	フローチャート	14
第4.6節	経路設計	15
第4.7節	画像認識	17
第4.8節	電源系	18
第4.9節	基板	18
第5章	システム試験	20
第5.1節	レギュレーションを満たすためのシステム試験	20
第5.2節	ミッションを達成するためのシステム試験	30
第5.3節	ミッションを達成するためのシステム試験	33
第6章	進捗, 予定	42
第7章	大会結果報告	43
第7.1節	目的	43
第7.2節	結果	43
第7.3節	考察	44
第8章	まとめ	45
第8.1章	工夫点・努力した点	45
第8.2章	課題点	46
第8.3章	今後の展望	46

第1章 ミッション定義

第1.1節 ミッションステートメント

衛星画像による経路設計を用いた誘導の実証

月や火星といった惑星探査においては、探査機の着陸精度は数百m ~数十km程度に留まるため、意中のミッションを実施するためには着陸後に探査機を目的地まで精密に誘導させる必要がある。現在火星で運用されているMars Curiosity Rover やPerseveranceはMars Reconnaissance Orbiter等の衛星から得られる画像から、ローバが目的地に到達するまでに通過すべきウェイポイントを人間が決定している。これらのローバは「Neck and Head」により胴体から離れて配置されたカメラで周囲を3Dスキャンし周囲の環境を把握することによって、指定されたウェイポイントまでの自律走行を繰り返し行っている。そのため、この誘導法では、ローバに対して指令を送る人員が地上局に必要となる。

一方、CanSatのような小型探査機の場合、前に挙げた大型ローバのようにカメラを用いて広範囲の3Dスキャンを行う能力に限りがある。加えて、従来のARLISSにおいては多くの参加チームがCanSatの位置座標と目標地の位置座標を基に誘導を行っており、ARLISSが開催されるブラックロック砂漠における経路上の轍や障害物への配慮が施されていない。

そこで、本チームは衛星画像を活用し、轍、障害物、土壌の状況を検知するアルゴリズムと、ウェイポイントを含む目標値までの経路を自律的に設計し誘導するアルゴリズム、を搭載するCanSatの開発を考案した。

ARLISS が開催されるブラックロック砂漠は車などが走行することによって、日々、土壌の環境が変化する。現在運用されている様々な周回衛星から得られる衛星画像は、Sentinel Hub, Te llus, 等の衛星データプラットフォームから入手可能である。これらのプラットフォームから提供される高頻度、高分解能の衛星画像を用いれば、ARLISSにおける環境変化への対策も施すことができると考えた。

これからの惑星探査にはCanSatのような小型探査機の活躍が期待される。今回の技術を惑星探査に応用することができれば、少数の地上局の監視のもと多数の小型探査機の効率的な運用が可能になると考えられる。さらに、周回衛星から送信される衛星画像の解像度が高くなれば、小型探査機の交換なしに探査精度の向上を達成することが期待できる。

第1.2節 ミッション内容

CanSatが衛星画像による経路設計法を用いて誘導をすること

過去のARLISSで多くの大学は図 1-1に示されるように、過去と現在のCanSatの位置情報より進行方向を求めゴール方向への角度 θ を逐次計算することによって誘導を行っていた。しかし、この方法ではブラックロック砂漠における経路上の轍、拠点などの障害物への配慮が無く、これが原因でスタックして誘導不能になるチームも見受けられた。

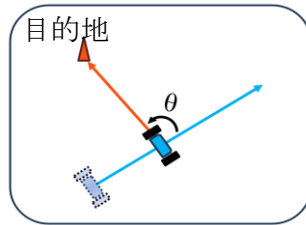


図 1-1 従来の誘導法

さらに、図 1-2に示されるように、衛星データよりARLISS 2023が開催された日時においてロケット発射地点から約4.8km地点に水分を含んだ土壌があったことが確認された。ロケットからの放出後に、着地点と目標地との間にこのような土壌がある場合、従来の誘導法では走行が困難になることが考えられる。これらの障害物の問題に対処するために、本チームは衛星画像を用いる。

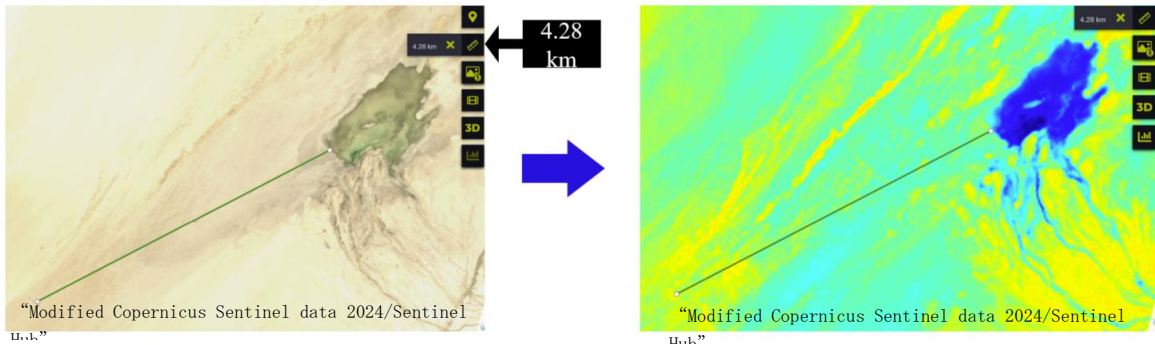


図 1-2 ロケット発射地点付近の水分を含む土壌

さらに、衛星画像を用いれば、搭載する経路設計のアルゴリズムによって、最短距離を誘導する経路、障害物から一定の距離を誘導する経路、等の様々な用途に合った経路を自律的に設計することが可能になる。そこで、本チームは、CanSatに経路設計のアルゴリズムを搭載することによって、ウェイポイントを含む経路を自律的に設計させ目標地に到達することを目指す。

従来多くのチームが単純にゴールの位置座標を目標座標として誘導を行っていたのに対して、本チームは経路設計によって自律的に決定されたウェイポイントの位置座標を目標座標として誘導を行うことを繰り返し、誘導を行う。ここで、衛星画像は衛星画像データプラットフォームから解像度2mの物入手し、ロケット搭載前にOBCに受け渡すことを予定している。

以上の内容を踏まえ、ミッションシーケンス図を図 1-3に示す。

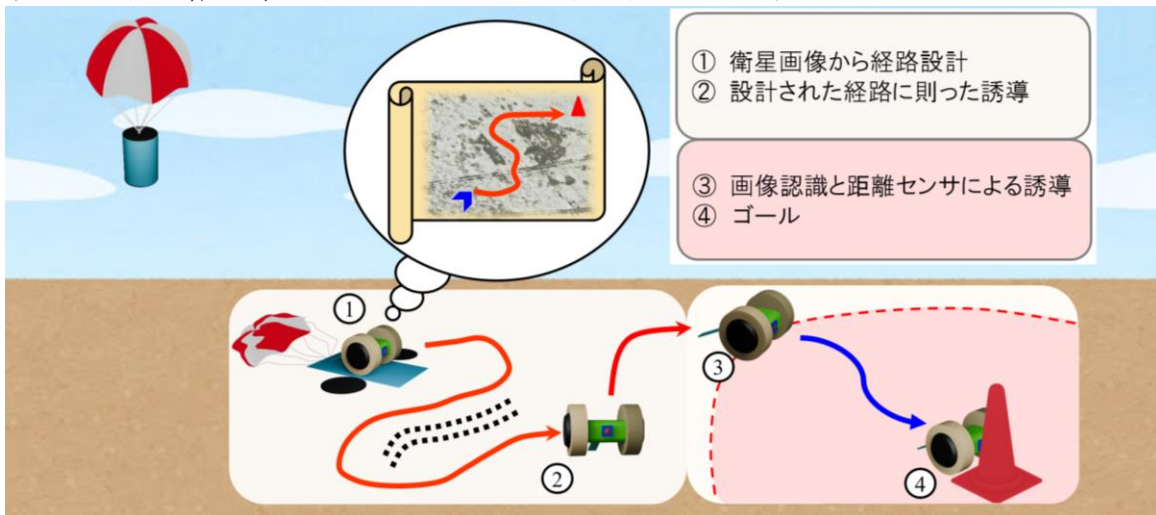


図 1-3 ミッションシーケンス図

第1.3節 サクセスクライテリア

サクセスクライテリアを以下の表 1-1に示す.

表 1-1サクセスクライテリア

ミニマムサクセス	衛星画像を用いて経路設計をし, 誘導を開始する
フルサクセス	経路設計に則った誘導により, ゴールから10m 圏内に入る
エクストラサクセス	ゴールに接触する

サクセスクライテリアを達成したかの指標を表 1-2に示す.

表 1-2サクセスクライテリア達成の指標

ミニマムサクセス	CanSat設定した第一ウェイポイントに向かい走行を開始した
フルサクセス	ウェイポイントを経てゴールから10m 圏内に移動した
エクストラサクセス	<ul style="list-style-type: none">・ 距離センサによる値が0.1m 以内になった・ CanSatがゴールコーンに触れ停止した

サクセスクライテリアを達成したかの検証方法を表 1-3に示す.

表 1-3サクセスクライテリア達成の検証方法

ミニマムサクセス	<ul style="list-style-type: none">・ CanSatに保存されたログの確認.・ CanSatからダウンリンクされたログの確認
フルサクセス	<ul style="list-style-type: none">・ CanSatに保存されたログの確認・ CanSatからダウンリンクされたログの確認・ 目視による確認
エクストラサクセス	<ul style="list-style-type: none">・ CanSatに保存されたログの確認・ CanSatからダウンリンクされたログの確認・ 目視による確認

第2章 システム要求

第2.1節 レギュレーションを満たすためのシステム要求

レギュレーションを満たすためのシステム要求を以下の表 2-1に示す。

表 2-1レギュレーションを満たすためのシステム要求

番号	レギュレーションを満たすためのシステム要求
R1	CanSatは質量が1050 g以内であり，直径146 mm，高さ240 mmの円筒に収まるサイズであること
R2	CanSatは紛失対策としてロケットから放出後位置が特定でき無線機を搭載すること
R3	CanSatは減速機構を搭載し終端速度が4~6 m/s 以下であること
R4	CanSatは打ち上げ荷重，振動，分離衝撃，パラシュート開傘衝撃に耐えること
R5	CanSatは放出まで無線機が電波を発しないこと
R6	CanSatに搭載する全ての無線機は要求に応じて周波数の変更を行えなければならない
R7	CanSatはロケットに搭載後メンテナンスなしにミッションを維持しなければならない
R8	CanSatはロケットに損傷を負わせる可能性のある機構や物質を搭載してはいけない
R9	CanSatは制御されることなく着地しなければならない

Comeback Competitionに参加するに際し，レギュレーションを満たすためのシステム要求を以下の表 2-2に示す。

表 2-2レギュレーションを満たすためのシステム要求 (Comeback Competition)

番号	レギュレーションを満たすためのシステム要求 (Comeback Competition)
CR1	CanSatは完全に自律的に制御されなければならない
CR2	チームはレギュレーションで指定されたコントロールレコードを提出しなければならない

第2.2節 ミッションを達成するためのシステム要求

ミッションを達成するためのシステム要求を以下の表 2-3に示す.

表 2-3 ミッションを達成するためのシステム要求

番号	ミッションを達成するためのシステム要求
M1	減速機構を搭載し終端速度が4~6m/s であること
M2	梱包材が衝撃を吸収すること
M3	CanSatが着地衝撃に耐える構造であること
M4	梱包材が展開すること
M5	減速機構が切り離し後機体に絡まらないこと
M6	CanSatが着地後に走行できる体勢になること
M7	CanSatが機体の位置座標を取得すること
M8	CanSatのメモリにあらかじめ保存する衛星画像を入手すること
M9	衛星画像の分解能が障害物、障害物の影の色を検知するのに十分であること
M10	CanSatが衛星画像に対する画像処理により障害物の抽出を行うこと
M11	CanSatが画像処理の施された画像に対する経路設計アルゴリズムの適用により経路設計を行うこと
M12	CanSatが目標地まで移動する動力源を搭載すること
M13	CanSatがカメラから撮影した写真に対して画像認識をしゴールを検出すること
M14	CanSatとゴールとの距離測定をすること
M15	CanSatがゴール判定をすること

第3章 システム試験項目の設定

第3.1節 レギュレーションを満たすためのシステム試験項目

システム要求番号がRであるレギュレーションを満たすためのシステム要求項目に対して検証項目を以下の表 3-1のように設定する。

表 3-1レギュレーションを満たすためのシステム要求項目①

番号	試験項目名	対応するシステム要求番号	実施日
RV1	質量試験	R1	8/2
RV2	キャリア収納・放出試験	R1	8/2
RV3	GNSSデータダウンリンク試験	R2	7/11
RV4	通信距離試験	R2	7/11
RV5	パラシュート開傘試験	R3	7/20
RV6	準静的荷重試験	R4	7/26
RV7	振動試験	R4	7/26
RV8	分離衝撃試験	R4	7/26
RV9	通信機電源OFF/ON試験	R5	7/22
RV10	周波数切替試験	R6	7/22
RV11	対ロケット安全性確認試験	R8	8/2
RV12	自律着地性確認試験	R9	7/20

システム要求番号がCRであるレギュレーションを満たすためのシステム要求項目に対して検証項目を以下の表 3-2のように設定する。

表 3-2レギュレーションを満たすためのシステム要求項目②

番号	試験項目名	対応するシステム要求番号	実施日
CRV1	自律制御性確認試験	CR1, R7	7/27
CRV2	制御履歴レポート試験	CR2, R7	8/2

第3.2節 ミッションを達成するためのシステム試験項目

ミッションを満たすためのシステム要求項目に対して検証項目を以下の表 3-3のように設定する。

表 3-3 ミッションを満たすためのシステム要求項目

番号	試験項目名	対応するシステム要求番号	実施日
MV1	着地衝撃試験	M1, M2, M3	7/20
MV2	梱包材展開&パラシュート分離試験	M4, M5, M6	7/26
MV3	走行性能確認試験	M12	7/26
MV4	ロングラン試験	M12	7/29
MV5	倒立検知試験	M6	7/31
MV6	一次誘導試験	M7, M8, M9, M10, M11, M12	8/1
MV7	ゴール判別試験	M13	7/25
MV8	二次誘導試験	M13, M14, M15	7/16
MV9	経路設計温度試験	M10, M11	8/2
MV10	End-to-End試験	全システム要求	8/2

第4章 システム仕様

第4.1節 機体概観

図 4-1, 図 4-2, 図 4-3, 図 4-4にそれぞれCanSatの正面図, 上面図, 背面図, 鳥瞰図を3DCADで示す.

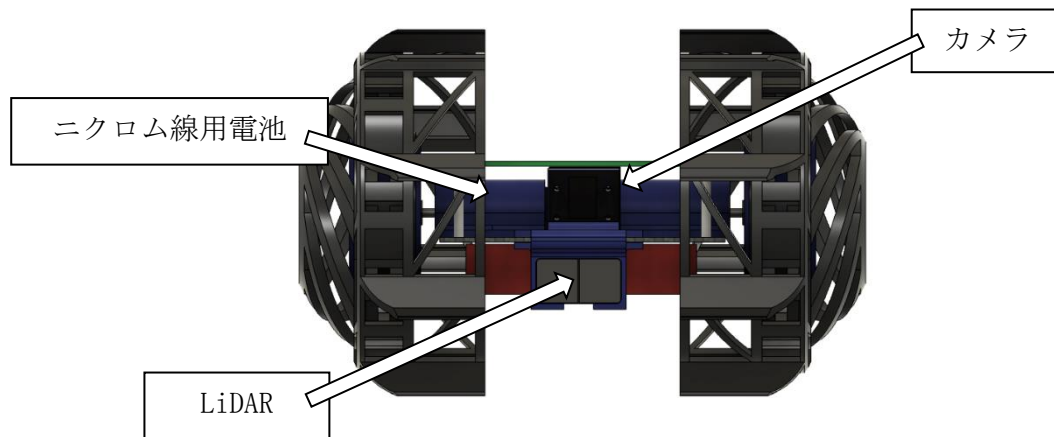


図 4-1 正面図

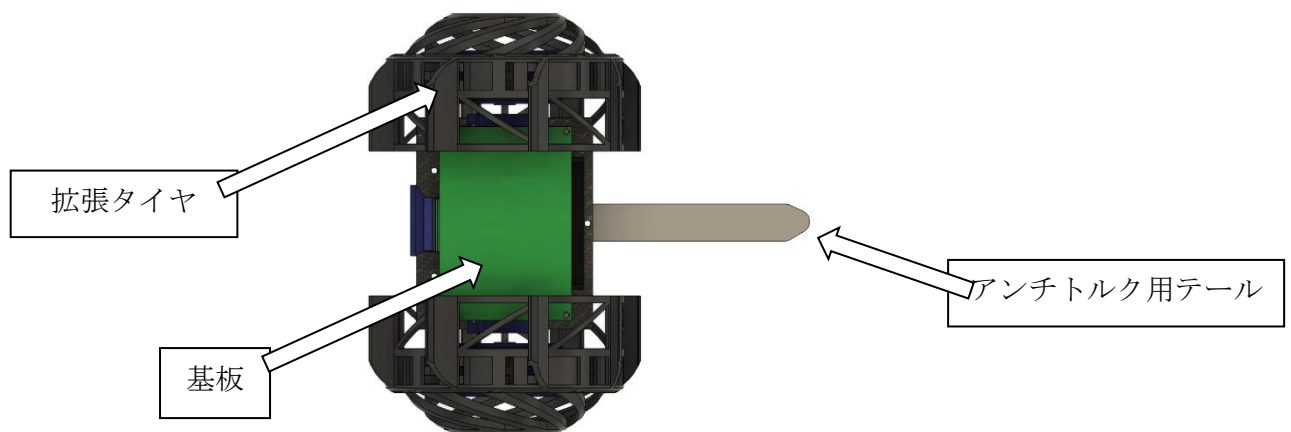


図 4-2 上面図

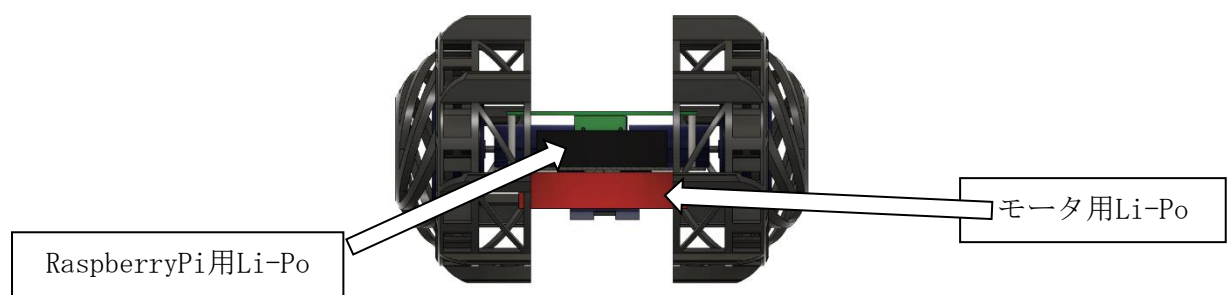


図 4-3 背面図

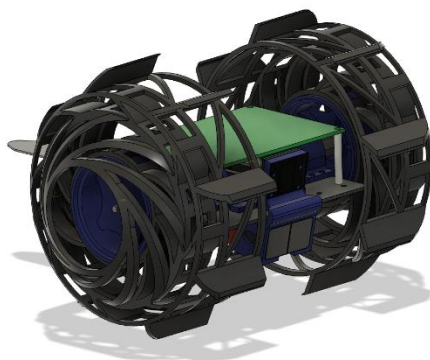


図 4-4 鳥瞰図

表 4-1にCanSatの寸法および質量を示す.

表 4-1 CanSatの寸法および質量

直径 [mm]	135mm(拡大前) 155mm(拡大後)
高さ [mm]	194mm(拡大前) 240mm(拡大後)
質量 [g]	約1018g

第4.2節 機体機構

CanSat のタイヤには 3D プリンタ用いてTPU素材で製造したタイヤを使用する. モータ, Li-Po バッテリ等を接地する機体部はカーボン板を用いる. LiDAR, カメラ等のマウントには3Dプリンタを用いてPLAで印刷した物を用いる. アンチトルク用テールにはコンベックスを用いる.

図 4-5にCanSatの左側面図, 図 4-6にCanSatの正面図のタイヤ付近の拡大図を示す.

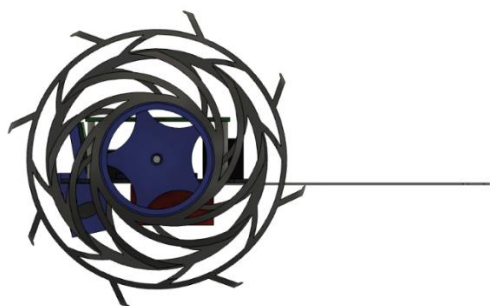


図 4-5 左側面図

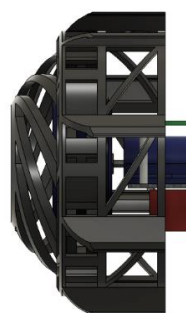


図 4-6 タイヤ付近の拡大図

図 4-5からわかるようにタイヤ中心から半径方向に伸縮性を持たせたバネ構造を用いることで, 着地の衝撃を吸収できるようにした. さらに, 図 4-6からわかるようにタイヤの回転軸方向にもバネ構造のある骨組みを取り入れることによってCanSatがタイヤの側面から着地した際の衝撃を吸収すると同時に, CanSatがタイヤの側面を接地し直立した時に, モータの制御によって走行可能な姿勢戻ることができるようにした. 実際に3Dプリンタで印刷したタイヤの写真を図 4-7に示す.



図 4-7 タイヤの写真

第4.3節 搭載機器

図 4-8にCanSatの試験機体を示す.

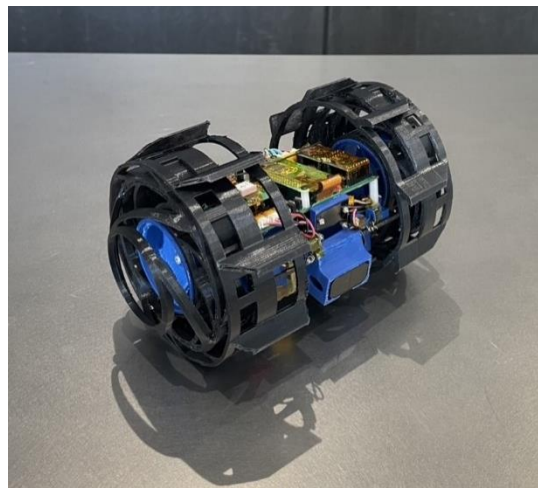


図4-8 試験機体

第4.4節 機体内観

システムブロック図を図4-9に示す.

ゴール検知に画像認識を行うための、カメラインターフェース(CSI)を持ち経路設計アルゴリズムを行うために十分な処理能力を持つRaspberry pi Zero 2WをOBCとして選定した. アクチュエータとしてはDCモータを2個搭載. 無線機としては、砂漠において地上局とCanSatの距離が5km取られた状態で通信が可能であると考えられるES920LR3を搭載. カメラモジュールとしてはオートフォーカス機能を搭載するRaspberry pi camera module v3を搭載. ゴールとなるコーンまでの距離を計測するためにLiDARとしてTFmini-Plusを搭載. 放出, 着地を検知するために気圧を計測するセンサとしてBME280を搭載. 打ち上げ, 放出, 着地, 反転を検知するために加速度を計測するセンサとしてH3LIS331DL搭載高耐衝撃性三軸加速度モジュールを搭載. 位置情報を計測するセンサとしてGPS受信機キット(1PPS出力付き「みちびき」2機受信対応)を搭載. CanSatの状態を確認するために確認用LEDを搭載. システムブロック図に示したコンポーネントは試験機体にて全て正常に稼働することを既に確認済みである.

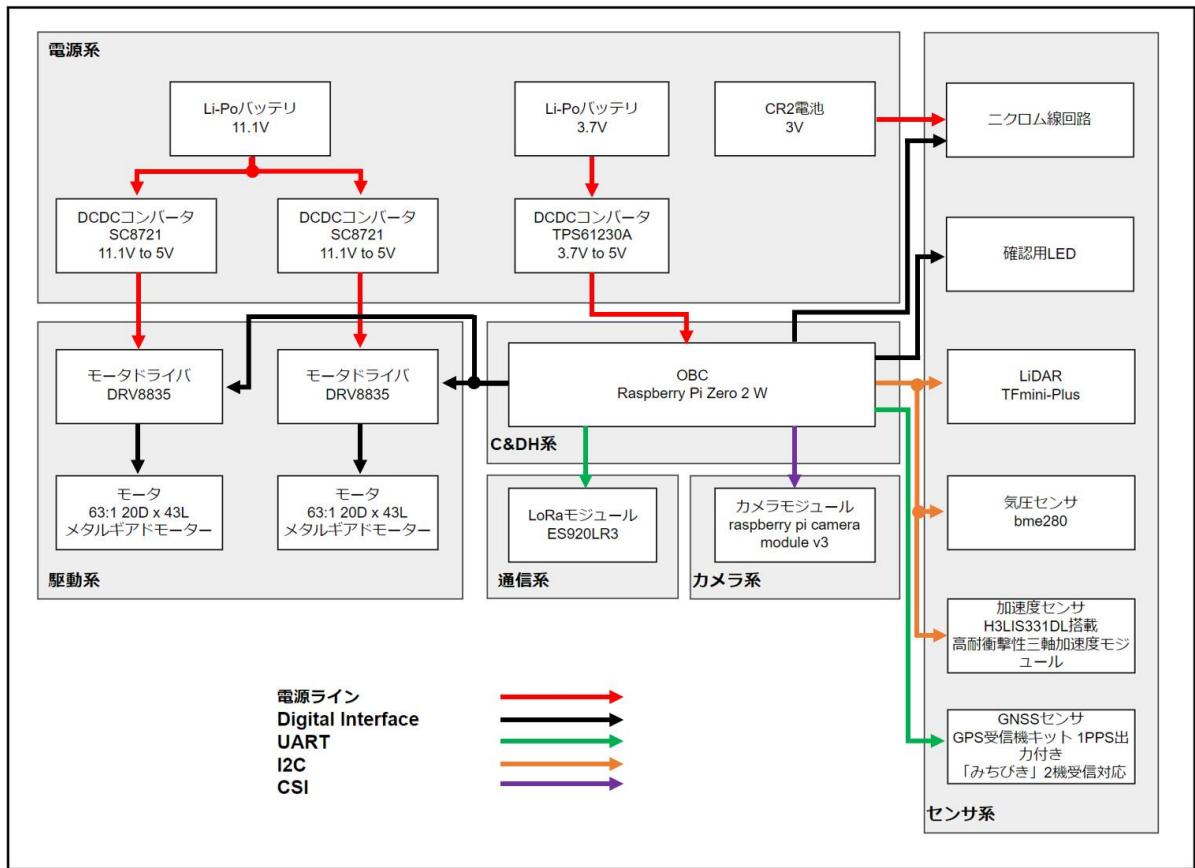


図 4-9 システムブロック図

第4.5節 フローチャート

全体を通したフローチャートを図4-10に示す.

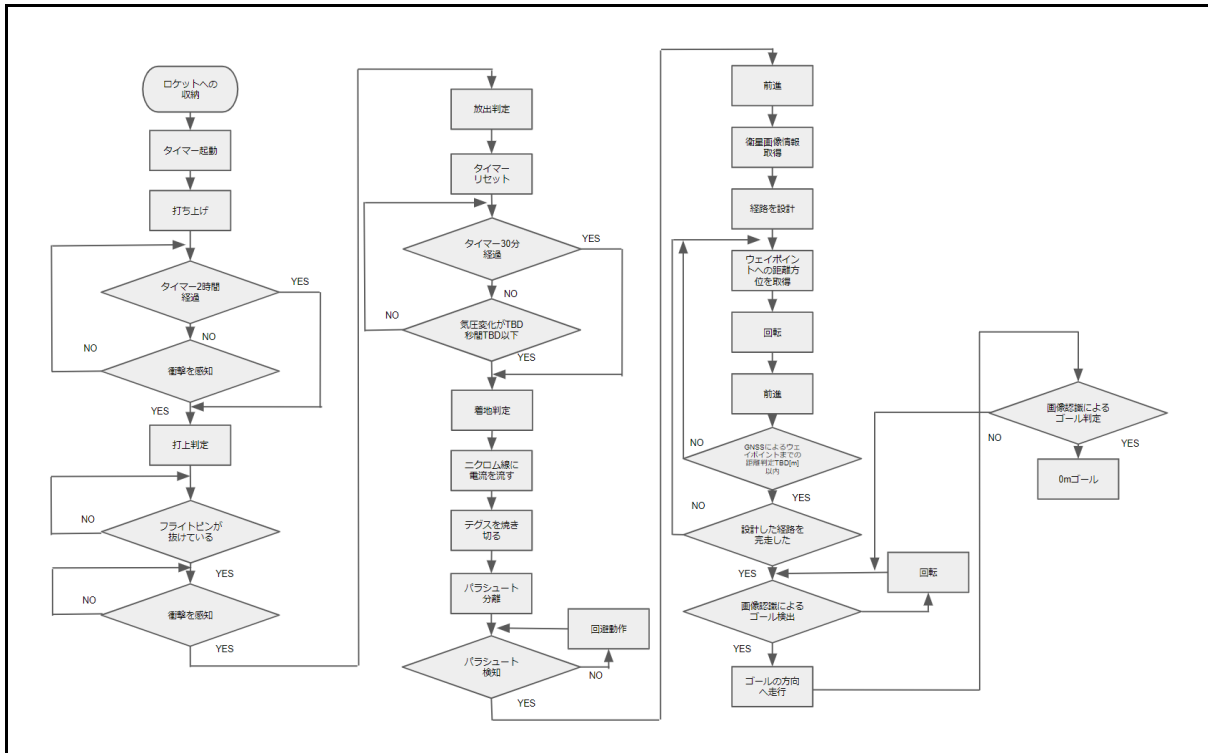


図4-10 フローチャート

ゴール付近における詳細なフローチャートを図4-11に示す.

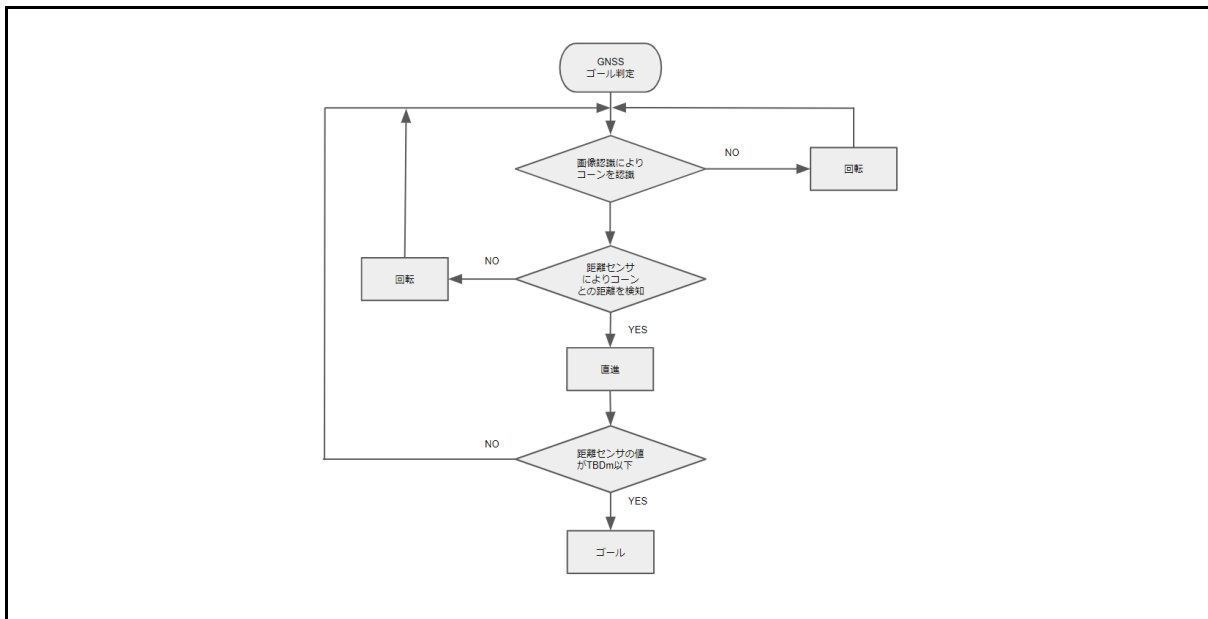


図4-11 ゴール付近におけるフローチャート

第4.6節 経路設計

➤ 衛星画像取得

経路設計に用いる衛星画像は衛星画像データプラットフォームから入手する。衛星画像データプラットフォームとしては、日本発の衛星データプラットフォームTellus, Googleが提供するGoogle Earth Engine, ESAの衛星データ配信プラットフォームSentinel-hubなど様々な物がある。本チームは衛星画像データプラットフォームSentinel-hubより衛星画像を取得する。Sentinel-hubを選ぶ利点として、人工衛星Sentinel-1などの衛星画像を無償で配布しており手軽に画像を入手可能であること、衛星データが定期的に更新されること(更新頻度は人工衛星によって異なる)、都市に限らず広範囲の画像を取得可能であること、GUIを設けておりユーザフレンドリであることなどが挙げられる。さらに、Sentinel-hubから有償で入手可能なMaxar Technologiesの人工衛星WorldViewは高解像度を持ち、本チームの経路設計用の画像に用いることができると考えられる。

個人が衛星画像プラットフォームから高解像度、高更新頻度の衛星画像を入手する際に問題になる点として費用が挙げられる[1]。例えば、Sentinel HubからMaxar WorldViewの衛星画像パッケージ(20km²)を入手するためには325EUR(2024年7月現在)必要である。そこで本チームは、ESAによって提供される学術スポンサーシップに応募をし、Sentinel Hubから60km²分のMaxar WorldViewの衛星画像パッケージを無償で取得することを承諾された。この衛星画像を用いることで、ARLISSの開催されるBlack Rock 砂漠状の輻等の障害物の影、色を検知することができる。と考える。

➤ 画像処理

経路設計により障害物を避ける経路を誘導するためには、衛星画像を処理することによって障害物を抽出することが必要である。そこでOBCにインストールしたOpenCVを用いることによって、衛星画像に対してグレースケール化、二値化、平滑化を順に施す。まず、グレースケール化によってカラー画像の各ピクセルのカラー情報を単一の輝度値に変換する。次にスレッシュホールド処理による画像の二値化を行う。スレッシュホールドの数値を変更することで考慮する障害物の程度を変更できる。例えば、輝値がある値より低い部分だけ残るように閾値を設ければ濃い影を持つ部分のみ抽出することになる。そして平滑化によるノイズ処理を行う。二値化を施した衛星画像にはスパイクノイズが多く存在するが、メディアンフィルタを活用することにより周囲のピクセルを考慮した平滑化によりこれを除去する。最後に設計された経路が実際の障害物と距離を保てるように、抽出された障害物のピクセルを膨張させ、障害物の範囲を見かけ上大きくする。

➤ 経路設計

経路設計にはダイクストラ法, DWA, RRT, A*(A star)など、様々なアルゴリズムが挙げられる。中でもA*は最短経路設計を確実かつ効率的に行うことができる。A*では現在位置から移動可能な候補のみに絞ってトータルコストFを計算し、候補のうち一番小さいFの位置(現時点で最もゴールに近い)へ移動をすることを繰り返すことによって最短経路の設計を行う。

スタートノードから現在ノードまでの距離をG

現在のノードからゴールノードまでの仮に見積もった距離をH

とするとFは式(1)で表される。

$$F = G + H \quad (1)$$

重量と形状の制限から搭載することができる電力量に制限があり、自律的に誘導を行うCanSatに適すアルゴリズムであると考えられる。なので、本チームはA*を用いて経路設計を行う。現時点で本チームのプログラムによりCanSatは画像のピクセルに対して水平、垂直、斜め45度の方向のみ進行できる。

➤ ウェイポイント抽出

本チームは経路設計によって自律的に決定された経路上のウェイポイントの位置座標を目標座標とする誘導を繰り返し行うため、設計された経路からウェイポイントを抽出する必要がある。そこで、設計した経路上において進行方向の角度変化が生じる点をウェイポイントとすればCanSatは設計された経路上を誘導するはずである。ウェイポイント抽出方法として、設計された経路を複数点に分け、連続する2つの点の傾きが変化している点を検索した。

➤ 模擬試験

上記の画像処理、経路設計を模擬的に行った結果を以下に示す。図4-12は衛星データプラットフォームSentinel-hub から入手したMAXAR社の衛星画像であり、2023年9月4日におけるARLISSの開催されるBlack Rock砂漠のゴール付近5km²を撮影したものである。画像内には轍、周囲と異なる地質からなる地面、があることが確認できる。図4-13はグレースケール化を施した画像である。モノクロ画像になっていることが確認できる。図4-14は二値化を施した画像である。白、黒、の2色のみからなる画像となり、轍の影、周囲と異なる色の地面が抽出されていることが確認できる。図4-15は平滑化を施した画像である。二値化された画像にあるスパイクノイズを削減したことが確認できる。図4-16は膨張化を施した画像である。抽出された障害物の見かけ上の大きさが大きくなっていることが確認できる。この際に膨張化させる程度をGNSSセンサの誤差範囲10m以上にするによってGNSSセンサの誤差によってCanSatが障害物に侵入することを予防することができる。図4-17は画像処理された画像に対して経路設計アルゴリズムを適応した画像である。あらかじめ設定したStart地点からGoal地点までを障害物から一定の距離を保ち経路設計し、さらにウェイポイント(赤点)を抽出していることが確認できる。



図4-12 オリジナル画像

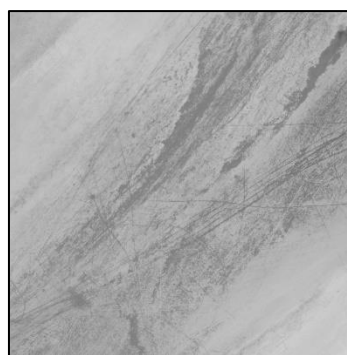


図4-13 グレースケール化画像

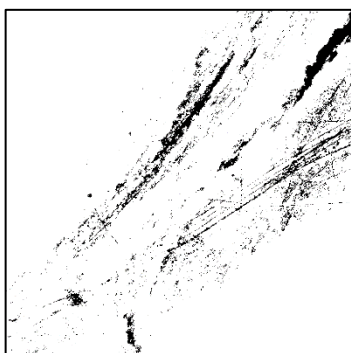


図4-14 二値化画像

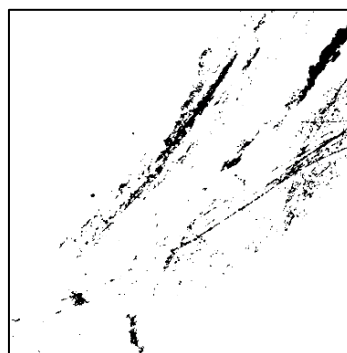


図4-15 平滑化画像

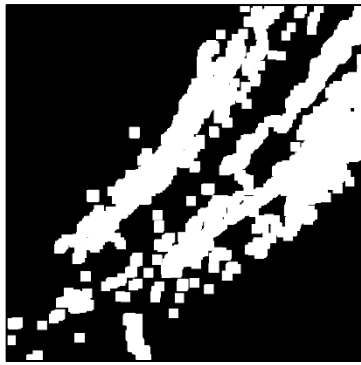


図4-16 膨張化画像

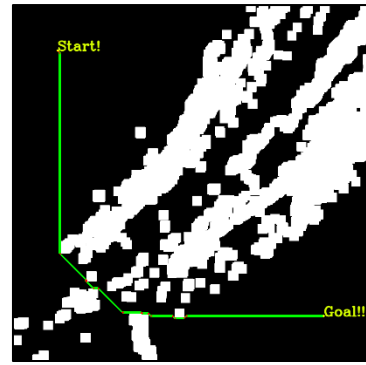


図4-17 経路設計画像

第4.7節 画像認識

ゴールより数m接近後にYOLOを用いた画像認識で誘導制御を行うために、カメラから取得した画像でコーンが写っているか判定し誘導を行う。YOLOとはオープンソースで提供されている画像認識ライブラリであり、信頼度スコアという要素を使用して認識を行う。信頼度スコアは「分割された領域に物体が入っていて、正確に領域を囲っているかの正確さ」と「各クラスの予測確率（画像に写っている物体が特定のクラスに属している可能性）」を意味する指標であり、高速で正確な予測を可能にしている。今回はUltraLytics社が提供しているYOLOv8を使用した。カメラはRaspberry Pi Camera Module V3を使用した。

図4.17のようにカメラから画像を取得し、コーンがあるか分析する。コーンを画像内で認識すると赤い四角で囲まれる。その四角い形状の重心から画像の中心からの距離を取得し、この情報をRaspberry Piに与えることで終端制御が可能となる。



図4-17 YOLOを用いた画像認識

第4.8節 電源系

電源図を図4.18に示す。モータ電源には2300mAh(11.1V)のLi-Poバッテリー，OBC電源には3600mAh(3.7V)のLi-Poバッテリー18650を選定した。これらは待機1.5時間，位置情報による経路誘導2時間，画像認識と距離センサによる誘導0.25時間に十分な容量を持つ。OBC用のLi-Poバッテリーとして円筒形18650を使用することで，過去多くのチームが使用していた矩形のLi-Poバッテリーを使用しに比べ充電管理，CanSatへの搭載が容易になることが期待される。これらの電源電圧をDC DCコンバータにより昇降圧し，モータドライバ，OBCに電力供給を行う。また，ニクロム線加熱用として小型であるCR2電池を使用する。

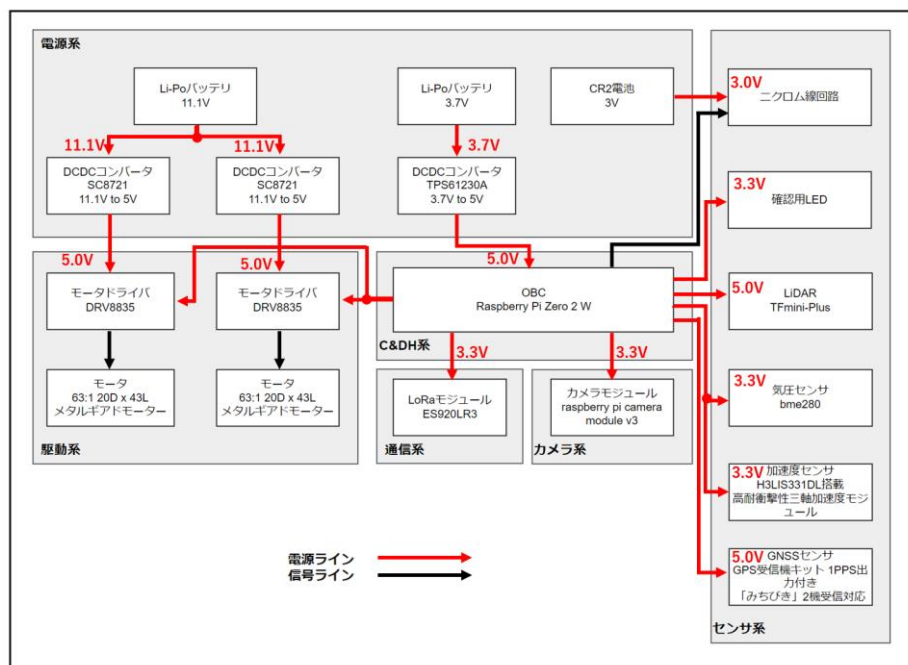


図4-18 電源図

第4.9節 基板

設計した基板の2D図を図4.19に，3D図を図4.20に示す。基板の寸法は75 mm × 110 mmである。設計した基板を元にプリント基板を発注する。

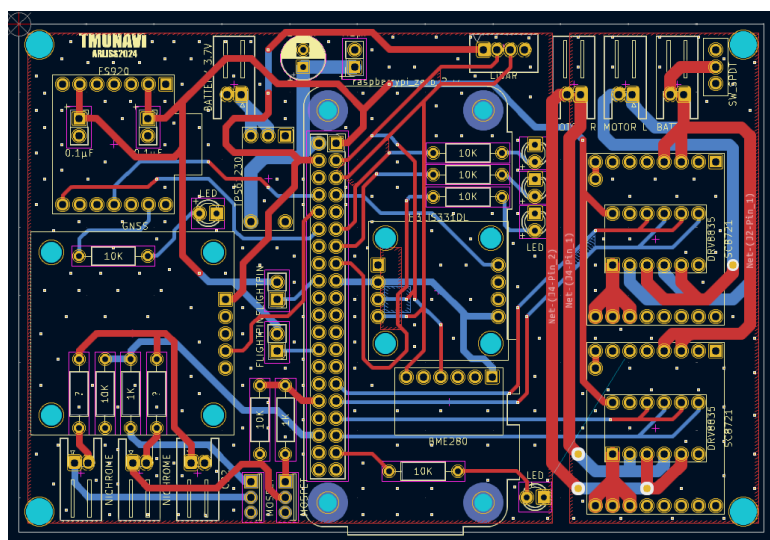


図4-19 基板2D図

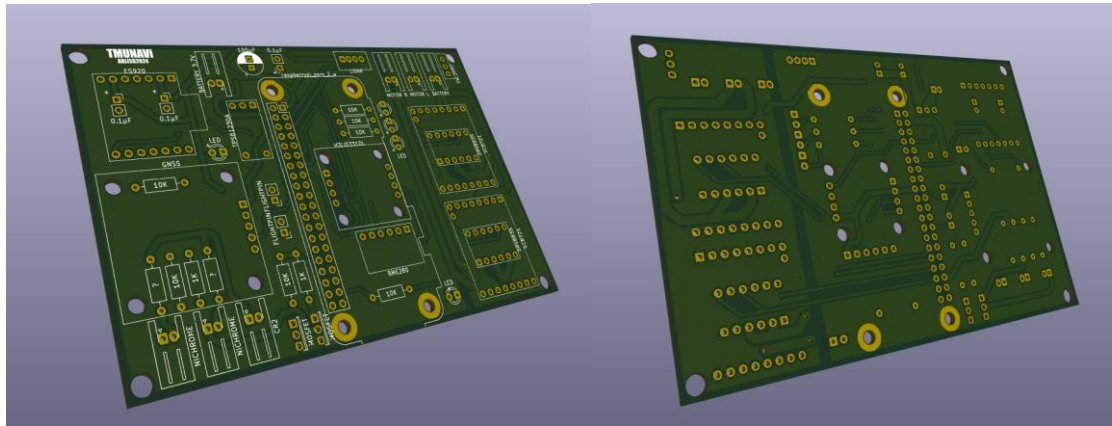


图4-20 基板3D图

参考文献

[1]

<https://sorabatake.jp/466/>

第5章 システム試験

再度試験項目を図5-1に示す。

番号	試験項目名
RV1	質量試験
RV2	キャリア収納・放出試験
RV3	GNSSデータダウンリンク試験
RV4	通信距離試験
RV5	パラシュート開傘試験
RV6	準静的荷重試験
RV7	振動試験
RV8	分離衝撃試験
RV9	通信機電源OFF/ON試験
RV10	周波数切替試験
RV11	対ロケット安全性確認試験
RV12	自律着地性確認試験

レギュレーションを満たすためのシステム要求項目①

番号	試験項目名
CRV1	自律制御性確認試験
CRV2	制御履歴レポート試験

レギュレーションを満たすためのシステム要求項目②

MV1	着地衝撃試験
MV2	梱包材展開&パラシュート分離試験
MV3	走行性能確認試験
MV4	ロングラン試験
MV5	反転検知試験
MV6	一次誘導試験
MV7	ゴール判別試験
MV8	二次誘導試験
MV9	経路設計温度試験
MV10	End-to-End試験

ミッションを満たすためのシステム要求項目

図5-1 試験項目一覧

第5.1節 レギュレーションを満たすためのシステム試験

RV1 質量試験

目的

- 減速機構とCanSatの合計質量がキャリア格納時に1050 g以下であり，Open Class のレギュレーションを満たすことを確認する。

試験内容

- 電子天秤を用いてCanSat本体とパラシュートの合計質量を計測する。

試験結果

- キャリアのみを電子天秤に載せた状態をゼロ点とし，その後，パラシュートを含む CanSat をキャリアに入れ測定した際の動画を以下のリンクに示す。

試験動画：<https://youtube.com/shorts/TbN50LagoRA?feature=share>

動画からロケットに収納する際の減速機構とCanSatの合計質量は1018[g]である。

結論

- 減速機構をCanSat が Open Class のレギュレーションである1050 g以下を満たすことが確認できた。

RV2 キャリア収納・放出試験

目的

- CanSatが直径146 mm以下かつ高さ240 mm以下で、寸法が Open Class の レギュレーションを満たし、キャリアに収納可能であることを確認する。
- キャリアを反転させた時、 CanSat が自由落下することを確認する。

試験内容

- CanSat本体とパラシュートがキャリアに収納されている状態で定規を用いて寸法を測定する。
- CanSat をキャリアに入れ反転させ、自由落下するかを確認する。

試験結果

- パラシュートを含めた CanSat の寸法を計測した際の様子を図5-2、5-3に示す。



図5-2 CanSatの寸法（直径）



図5-3 CanSatの寸法（高さ）

図から、CanSat は直径 130[mm]で高さは 240[mm]である。

- CanSat がキャリアに搭載された状態からキャリアを反転させたときの動画を以下のリンクに示す。
試験動画：<https://youtu.be/RmJss7suR9o>
上記の動画より、CanSat はキャリアから自由落下することが分かった。

結論

- 寸法が OpenClass のレギュレーションである直径 146[mm]，高さ 240[mm]以下を満たすことが確認できた。
- キャリアに搭載された状態から自由落下することを確認できた。

RV3 GNSSデータダウンリンク試験

目的

- ロスト対策として、ロケットから分離された後のCanSatの位置情報を地上局側で特定できることを確認する。

試験内容

- CanSatにGNSSセンサと無線機を搭載し、GNSSセンサで取得した位置情報を無線機で送信し、そのデータを地上局で受信できることを確認する。このとき、CanSatと地上局間の距離も確認する。CanSat に搭載する通信機は、EASEL 社の ES920LR3 である。この通信機を用いて位置座標を無線送信し続ける CanSat を地上局から遠ざける。CanS

atにGNSSセンサと無線機を搭載し、GNSSセンサで取得した位置情報を無線機で送信し、地上局は受信したデータをターミナルソフト上で確認、記録を行う。

試験結果

- 以下の図5-4は、CanSat から送信された位置情報を Google Map 上にプロットした図である。プロットされた位置はCanSatを運んだ際の位置座標と概ね等しく、誤差は運用に影響しない程度のものである。



図5-4 CanSatから送信された位置情報

結論

- CanSat から位置情報をダウンリンクすることが確認でき、ロスト対策に有用であることを確認できた

RV4 通信距離試験

目的

- ロスト対策として、ロケットから放出された後、CanSat が高度 4~5km から位置情報を送信することが求められるため長距離通信できることを確認する。

試験内容

- CanSatに搭載するES920LR3のアンテナにワイヤアンテナを用いる。地上局側にはES920LR3に外付けアンテナを装着する。以下の図5-5に示すデータシートによると、外付けアンテナとワイヤアンテナを用いると LoRa 変調使用時で見通し5kmの通信が可能であるとされている。そのため、まずは見通し距離4kmで通信ができることを確かめる。その後、通信距離を伸ばしどこまで通信することができるかを確かめる。試験場所は見通しが良い江の島付近の海岸で実施する。地上局側は以下に示す位置座標で待機をし、CanSat 側の通信機を移動させ、最大通信距離を測定する。

ES920LR3 : U.FLコネクタ+同軸ケーブル+920MHz用アンテナ
(ダイポールアンテナ等)

ES920LR3A1 : ワイヤアンテナ

本来の通信距離を確保するためには、外付けアンテナが必要ですが、通信距離が短くても良い用途では、ワイヤアンテナタイプの使用も可能です。

アンテナタイプ	通信距離の目安	
	LoRa変調使用時	FSK変調使用時
外付けアンテナ - 外付けアンテナ	見通し10km	見通し1200m
外付けアンテナ - ワイヤアンテナ	見通し5km	見通し400m
ワイヤアンテナ - ワイヤアンテナ	見通し2km	見通し200m

※通信距離は参考値です。保証値ではありませんのでご注意ください。

図5-5 ES920LR3の通信距離

地上局位置座標 : <https://maps.app.goo.gl/L18zeYRGiuWV7a8G8>

試験結果

- 以下の図5-6は、CanSatから緯度経度の位置情報がES920LR3によって通信できた最大距離である。



図5-6 最大通信距離

試験を行った際の地上局，CanSat側で撮影した動画のリンクを以下に示す。

CanSat側試験動画：<https://youtube.com/shorts/mABRhr5VA4c?si=v13J6HDS8n5VBSH9>

地上局側試験動画：<https://youtu.be/Smko5nj5lok?si=DC9j4QmyCpZ0UU7F>

結論

- 本試験では、約4kmの通信が最大通信距離であった。通信距離が5km以下となったが、ARLISS会場であるBlackRock砂漠は電波干渉が非常に少なく、4km以上の通信距離が見込まれることから、選定した通信機は長距離通信が可能でありロスト対策として有効であるといえる。

RV5 パラシュート開傘試験

目的

- キャリアから放出された後、設計したパラシュートが正常に開傘することを確認する。
- パラシュートによりレギュレーションで定められた終端速度（4 m/s以上6 m/s以下）まで減速が可能なことを確認する。
- 着地後にパラシュートを含む減速機構がCanSatに覆いかぶさらないことを確認する。
- CanSatの機体が着地衝撃に耐えられることを確認する。

試験内容

- 2024年7月20, 21日に群馬県渋川市北橘町真壁，北橘総合グラウンドにて行われる投下試験にて、パラシュートを付けたCanSatを約50 mの高さからドローンによって落下させパラシュートが正常に開傘することを確認し、着地後にCanSatが以上なく動作することを確認する。
- 図6-7に示す実験場所（東京都立大学日野キャンパス5号館南に位置する外階段の最上階）からパラシュートを付けたCanSatを約15 mの高さから落下させ、撮影した動画を用いてパラシュートとともに落下するCanSatの終端速度を測定する。



図5-7 実験場所^[1]

試験結果

- ▶ 投下試験にてパラシュートを付けたCanSatを約50mの高さからドローンによって放出した際の様子を撮影した動画のリンクを以下に示す。

試験動画：<https://youtu.be/BzmiqUVuVR8>

大学構内で行なった試験の様子を撮影した動画のリンクを以下に示す。

試験動画：<https://youtu.be/viCvDw1KJlo?si=Y7JjP0SkW2m7-PtD>

上記2つの動画から分かるように、キャリアから放出後パラシュートが正常に展開し、CanSat が着地衝撃に耐え、走行を開始した。動画のフレームレートは30fpsであり、1フレームの間にパラシュートが移動した距離は伸び切った時のコンベックスの長さから約14.5cmである。よってCanSatの終端速度は約4.4[m/s]である。

結論

- ▶ 多少の誤差があるものの、パラシュートの終端速度は設計値である4.5[m/s]に近い値となっていることが分かる。これはレギュレーションで定められた終端速度4-6[m/s]を満たしている。
- ▶ キャリアから放出後にパラシュートが正常に開き、CanSat が着地衝撃に耐えられ、その後の走行性能にも問題がないことが分かった。

RV6 準静的荷重試験

目的

- ▶ ロケット打上げ時の準静的荷重にCanSatが耐えられることを確認する。
- ▶ 打ち上げ時の準静的荷重によってCanSatが機械的、電氣的な破損を受けず、動作異常生じないことを確認する。

試験内容

- ▶ ARLISS2024 のレギュレーションに従い、準静的試験の試験条件としてCanSat に正弦波加振 20[Hz]、10[G]、10[s]加え、試験前後でCanSatの動作に相違がないことを確認する。CanSat は電源を投入し、加振機のキャリアに本番と同様に収納する。実際の試験条件を設定した際の様子を図5-8に示す。MV6、MV7、MV8の試験を連続で実施するため、準静的荷重、振動荷重、衝撃荷重の順で荷重を加える。その後、CanSat を取りだし構造的な破損、電装機器が正常に動作することを確認する。

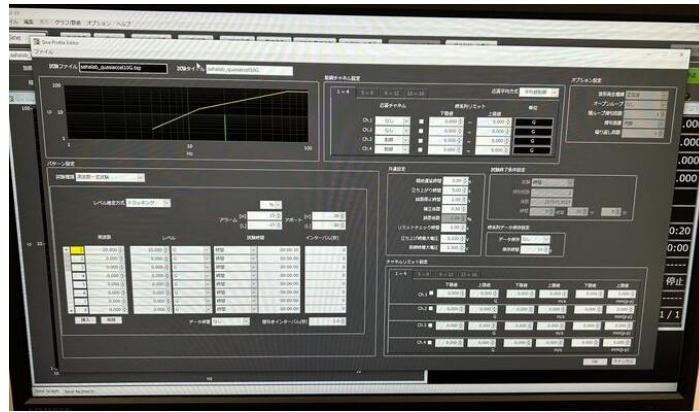


図5-8 加振設定(準静的試験)

試験結果

- ARLISS2024 のレギュレーションに基づいて、CanSat に正弦波加振 20[Hz]で 10[G] を 10[s]加えた際の試験の様子を撮影した動画のリンクを以下に示す。

試験動画:https://youtu.be/Yvl_149aSX0

動画から、試験実施後も CanSat は正常に走行できることが分かった。よって、打ち上げ時の準静的荷重によって CanSat が機械的、電氣的な破損および異常をおこさないことを確認できた。

結論

- 打ち上げ時の準静的荷重によって CanSat に機械的、電氣的な破損がなく、異常をおこさないことが確認できた。

RV7 振動試験

目的

- ロケット打ち上げ中にキャリア内での振動に対してCanSatが耐えられることを確認する。打ち上げ時の振動によってCanSat が機械的、電氣的な破損を受けず、動作異常生じないことを確認する。

試験内容

- ARLISS2024 のレギュレーションに従い、振動試験の試験条件としてはCanSatにランダム加振 15[Grms], 30~2000[Hz], 30[s]を加え、試験前後でCanSatの動作に相違がないことを確認する。CanSat は電源を投入し、加振機のキャリアに本番と同様に収納する。MV6, MV7, MV8の試験を連続で実施するため、準静的荷重、振動荷重、衝撃荷重の順で荷重を加える。その後、CanSat を取りだし構造的な破損、電装機器が正常に動作することを確認する。

試験結果

- ARLISS2024 のレギュレーションに基づいて、目標の波形データである 15[Grms] となるように CanSat に加振周波数 30~2000[Hz]でランダム振動を 30[s]を加えた。その結果のグラフを以下の図5-9に示す。ただし、縦 PSD[(G)²/Hz], 横軸は周波数[Hz]の両対数グラフである。PSD については、この範囲を積分して平方根をとると 15[Grms]になる。



図5-9 加振結果(振動試験)

- 振動試験の様子を撮影した動画のリンクを以下に示す。

試験動画：https://youtu.be/Yv1_149aSX0

動画から、試験実施後も CanSat は正常に走行できることが分かった。よって、打ち上げ時の準静的荷重によって CanSat が機械的、電氣的な破損および異常をおこさないことを確認できた。

結論

- 打ち上げ時の振動によって CanSat に機械的、電氣的な破損がなく、異常をおこさないことが確認できた。

RV8 分離衝撃試験

目的

- ロケットから分離される際の衝撃によって CanSat が機械的、電氣的な破損および異常を起こさないことを確認する。
- また、ロケットから分離される際の開傘衝撃によってパラシュートに破損および異常が生じないことを確認する。

試験内容

- ARLISS2024 のレギュレーションに従い、振動試験の試験条件としてはCanSatに正弦波半ショック加振で最大 40[G]として、三段階に分けて連続して加振させる。CanSat は電源を投入し、加振機のキャリアに本番と同様に収納する。MV6, MV7, MV8の試験を連続で実施するため、準静的荷重、振動荷重、衝撃荷重の順で荷重を加える。その後、CanSat を取りだし構造的な破損、電装機器が正常に動作することを確認する。
- パラシュートの開傘時を、ロケットから放出されたときの CanSat の速度が 100[km/h]、放出後 0.8 秒でパラシュートが開き、重さ約 1[kg]の CanSat が 4.5[m/s] まで減速すると想定する。力積の式 $F \cdot \Delta t = M \cdot \Delta V$ より、この時に生じる荷重 F は約 29.13[N]とわかる。この想定と同じ条件を再現することを考える。1[m]の高さから落下させたとき、力学的エネルギー保存則より速度は約 4.44[m/s]となる。この速度が約 0.45 秒で 0[m/s]まで減速すると仮定する。改めて、力積の式に値を代入すると、 $M \approx 2.96$ と求めることができる。これらのことから、パラシュートの先端を固定し、末端に約 2.96[kg]の錘を付けて高さ 1[m]から落下させることで、想定した条件を再現できる。

試験結果

- 今回の試験では、最大荷重を 40[G]として、-6[dB]、-3[dB]、0[dB]の三段階に分けて連続して加振させた。図5-10中の制御データには最大の加振である 0[dB]を加えたときの様子を表示している。グラフより、制御データと目標データが非常に近い値になっているので、試験条件は適切であるといえる。



図5-10 加振結果(分離衝撃試験)

分離衝撃試験の様子を撮影した動画のリンクを以下に示す。

試験動画：https://youtu.be/Yv1_149aSX0

動画内にあるように、試験実施後も CanSat は正常に走行できることが分かった。よって、打ち上げ時の準静的荷重によって CanSat が機械的、電気的な破損および異常をおこさないことを確認できた。

- 次に、パラシュート開傘衝撃試験について結果を示す。試験条件は前述の通り、パラシュートの先端を固定し末端に約 2.96[kg]の重りを付けて高さ 1[m]から落下させた。ここで、錘には合計3[L]の液体が入ったペットボトルを用いた。この試験を計 3回行った。その様子を撮影した動画のリンクを次に示す。

1回目の試験動画：https://youtube.com/shorts/m51qulHVx_8

2 回目の試験動画：<https://youtube.com/shorts/0bkAZOd-6ME>

3 回目の試験動画：https://youtube.com/shorts/yPY1QvLL_ZE

試験を 3回行った後もパラシュート本体、紐、紐とパラシュートの接合部のいずれにも破損は見られなかった。

結論

- 打ち上げ時の分離衝撃によってCanSatが機械的、電気的な破損および異常をおこさないことが確認できた。また、パラシュートが開傘時の衝撃に耐えられることが分かった。

RV9 通信機電源OFF/ON試験

目的

- ロケット搭載時、無線機の電波を発しない状態にできることを確認する。

試験内容

- 搭載する無線機ES920LR3をソフトウェアでスリープ状態にすることで、電波を発しない状態にすることができているか確認する。

試験結果

- 無線機に設定を加え、状態を変化させた際の様子を以下の動画に示す。

試験動画：<https://youtu.be/z5FiDoU68VI>

動画より、無線機をソフトウェアでスリープ状態にすることで電波を発しない状態にできることを確認できた。

結論

- ロケット搭載時に無線機が電波を発しない状態にできることがわかった。

RV10 周波数切替試験

目的

- 無線機のチャンネルが変更可能であることを確認する。
- CanSat に搭載する無線機の周波数を変更できることを確認する。

試験内容

- CanSatと地上局が通信可能である状態から、地上局の無線機のチャンネルを変更することでCanSatへ通信できないことを確認する。その後、CanSatの無線機のチャンネルを地上局側の無線機と同じチャンネルにし、通信可能であることを確認する。CanSatに搭載する通信機は EASEL 社製の ES920LR3 である。図5-11の通り、LoRa 変調を行う場合、帯域幅 125kHz 以下の場合にはチャンネル数が 38 で、本大会に参加するチームは 17チームであることから十分なチャンネル数があることを確認できる。よって、複数のチャンネルに変更することができれば、周波数を変更する意思があると示すことができると考えられる。通信機から地上局を想定した通信機にデータを送信する。次に地上局側の通信機のチャンネルを変更し、CanSatでデータが受け取れないことを確認し、CanSatのチャンネルを地上局に合わせることで周波数を変更できることを確認する。

4.2.2. LoRa 変調

① 帯域幅・チャンネル

ARIB STD-T108の規定により920.6～928.0MHzの帯域を使用します。

帯域幅	チャンネル数	備考
125kHz以下	38ch	920.6MHzから200kHz間隔
250kHz	19ch	920.7MHzから400kHz間隔

図5-11 ES920LR3のチャンネル数

試験結果

- CanSat 側の通信機 ES920 LR3 と地上局の通信機 ES920LR3 をチャンネル 7 に設定した。CanSat に搭載する通信機から模擬データを送信し、地上局で受信できることを確認した。その次に地上局に搭載する通信機のみ周波数チャンネルを 6 に変更し、その状態で CanSat 側からデータを送信し、地上局で受信できないことを確認した。その後、CanSat 側の周波数チャンネルを 6 に変更し、通信ができることを確認した。試験の様子を以下の動画に示す。

通信周波数変更試験の様子：<https://youtu.be/tVMb-k7bXHY>

通信周波数変更試験の様子(PC画面)：<https://youtu.be/AamBzOUmwEk>

結論

- CanSat に搭載する無線機の周波数を変更できることを確認できた。

RV11 対ロケット安全性確認試験

目的

- CanSatがロケットに損傷を負わせる可能性のある機構や物質を搭載していないことを確認する。

試験内容

- CanSat本体を手で触りロケット内を損傷させるような突起物がないことを確認する。

試験結果

- 試験の様子を撮影した動画のリンクを以下に示す。手でCanSatロケット内を損傷させるような突起物がないことを確認できた。

試験動画：<https://youtube.com/shorts/FgmoeLqWkSQ>

結論

- CanSatがロケットに損傷を負わせる可能性のある機構や物質を搭載していないことを確認できた。

RV12 自律着地性確認試験

目的

- CanSatが制御されることなく着地することを確認する.

試験内容

- 放出判定から着地判定までの間に、モータが作動しないことを目視で確認する.

試験結果

- 投下試験の際の動画から、放出判定から着地判定までの間にモータが作動していないことが分かる. 投下試験の際の動画のリンクを再度以下に示す.

試験動画：<https://youtu.be/BzmiqUVuVR8>

結論

- CanSatが制御されることなく着地することを確認できた.

参考文献

- [1] 東京都公立大学法人. 建物図面 日野キャンパス配置図. <https://www.houjin-tmu.ac.jp/assets/library/2019/04/8595tatemonozumen0b16.pdf> (最終閲覧日 2024/07/04)

第5.2節 ミッションを達成するためのシステム試験

CRV1 自律制御性確認試験

目的

- CanSatが完全に自律的に制御されることを確認する。

試験内容

- CanSat を位置座標によって設定した目的地にGNSSセンサを用いた誘導によって制御させ、CSVファイルに保存されたCanSatの制御予定量と実際の制御量に相違ないことを確認する。

試験結果

- 図5-12は実際に制御されたCanSatの走行の軌跡を表記したものである。図5-13は制御予定量である。

制御アルゴリズムの簡単な説明：私たちのCanSatはまず衛星画像をもとにゴールまでの経路を設計しウェイポイントを抽出する。誘導開始後は、進行方向を見て、目的地（ウェイポイント、ゴール）が左にあるか右にあるかでモータの出力を変化させ制御する。緯度と経度の情報は、CanSatに搭載されたGNSSセンサから取得する。その結果に基づいて、CanSat内部でターゲットへの相対方位と距離を計算する。これらの情報に基づき、CanSatの左右の車輪への入力制御する。CanSatはこれらのフィードバックを繰り返すことで自律的に制御される。

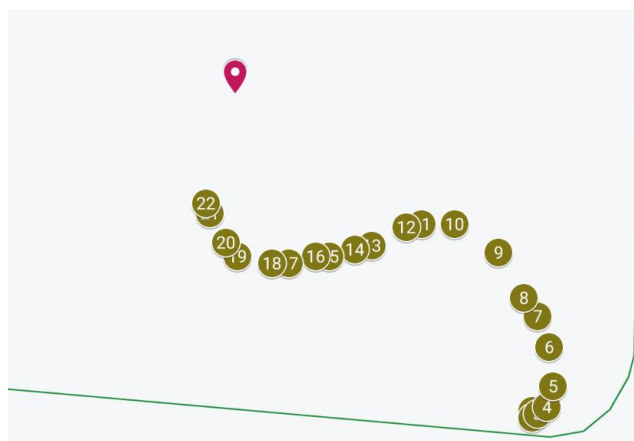


図5-12 実際の制御量

number	direction	control time	angle	date
1	R	1.11995959	130.872408	18:38:30
2	R	1.12439925	131.496468	18:38:31
3	R	1.37234786	164.335847	18:38:32
4	L	1.27658691	152.077821	18:38:33
5	L	0.96266238	107.675102	18:38:34
6	L	0.64057042	48.6633274	18:38:36
7	L	0.57746707	32.7102555	18:38:38
8	L	0.54348339	22.2580995	18:38:39
9	L	0.60766406	40.7367453	18:38:41
10	L	0	0.8998597	18:38:44
11	R	0.56685368	29.6498635	18:38:46
12	R	0.59964363	38.6876352	18:38:47
13	R	0.693847	60.2899914	18:38:49
14	R	0.69422558	60.3684633	18:38:50
15	R	0.7341497	68.3809154	18:38:52
16	R	0.71705836	65.0114989	18:38:53
17	R	0.80995996	82.440933	18:38:55
18	R	0.79939347	80.5565251	18:38:56
19	R	0.79237341	79.2923135	18:38:58
20	R	0.72974462	67.5205656	18:38:59
21	R	0.65391517	51.6963777	18:39:01
22	R	0.63608939	47.6235779	18:39:02

図5-13 制御予定量

- 誘導を行った際の動画を以下に示す。
試験動画：<https://youtube.com/shorts/UU5bXTKPre4?si=qEnOvMylo1Bgup1F>
- 図5-12と図5-13よりCanSat の制御がCSVファイルに保存されたCanSatの制御予定量と相違なく、動画から制御アルゴリズムによってウェイポイント，ゴールまで誘導できることを確認できた。

結論

- CanSatが完全に自律的に制御させ，制御アルゴリズムによってウェイポイント，ゴールまで誘導できることを確認できた。

CRV2 制御履歴レポート試験

目的

- ミッション終了時にCanSatからログデータを取得し，制御履歴レポートを作成できるか確認する。

試験内容

- CanSat を目的地まで走行させ，その際に制御履歴を保存する．GNSSセンサの誘導によるゴール判定後に電源にSDカードを抜き取り，csvファイルとして保存していたCanSatの位置座標，その時の時刻，制御量，方位角を表にし，実際制御履歴レポートを作成できることを確認する。
- 図5-14はCanSatの走行の軌跡をGoogle Mapで表示させたものである．図5-15は制御履歴である．誘導を行った際の様子を以下の動画に示す。

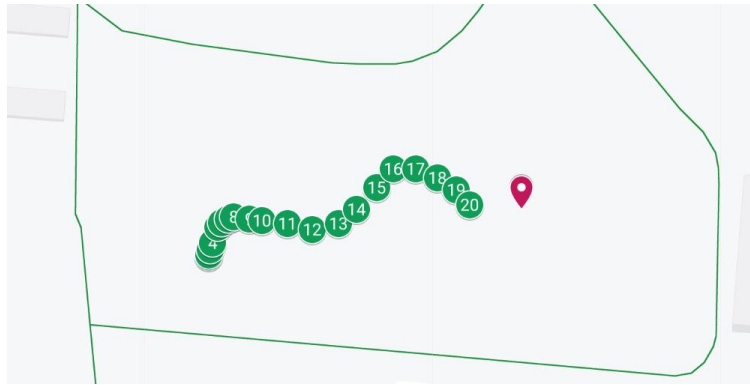


図5-14 走行の軌跡

number	latitude	longitude	direction	time	angle	distance	mode	date
1	35.66058	139.3668	L		0	7.125016	33.9759 A*6E	18:35:47
2	35.66059	139.3668	R	0.597485	38.12697	33.94966	A*63	18:35:48
3	35.66059	139.3668	R	0.67957	57.29223	33.72781	A*6A	18:35:49
4	35.6606	139.3668	R	0.684158	58.2639	33.3449	A*61	18:35:50
5	35.66061	139.3668	R	0.836592	87.09809	32.61017	A*63	18:35:52
6	35.66062	139.3668	R	0.762703	73.8328	32.28213	A*69	18:35:53
7	35.66062	139.3668	R	0.551539	24.92847	31.51851	A*5C	18:35:55
8	35.66062	139.3668	R	0.534744	19.16564	30.9131	A*58	18:35:56
9	35.66062	139.3668	L		0	11.22471	29.26993 A*5A	18:35:58
10	35.66062	139.3669	L		0	9.749919	27.92844 A*57	18:35:59
11	35.66062	139.3669	L		0	9.425004	25.10233 A*61	18:36:01
12	35.66061	139.3669	L	0.533244	18.61016	22.60344	A*53	18:36:03
13	35.66062	139.367	R		0	7.379757	19.71667 A*5F	18:36:05
14	35.66063	139.367	R	0.625	45	17.7	A*59	18:36:07
15	35.66065	139.367	R	0.599256	38.58733	15.74883	A*58	18:36:09
16	35.66067	139.367	R	0.6504	50.90614	14.40762	A*58	18:36:11
17	35.66067	139.367	R		0	9.712456	12.12846 A*5F	18:36:13
18	35.66066	139.3671	L		0	3.856801	9.565438 A*5A	18:36:15
19	35.66065	139.3671	L	0.553281	25.48725	7.322766	A*62	18:36:17
20	35.66063	139.3671	L	0.612332	41.90594	5.561663	A*6E	18:36:19

図5-15 制御レポート

試験動画：<https://youtube.com/shorts/08Ptb0y7YXY?si=DPCUBKQnc3dH96R->

図5-14と図5-15より CanSat が制御ログを取得することが可能であり、ログを取り出すことも可能であることが確認できた。また、制御ログには制御に必要な値(現在地を表す緯度、経度や CanSat が移動している方位角、CanSat からターゲット方向の方位角)とそれらから計算された制御の結果も保存できることを確認できた。

結論

- ミッション終了時CanSatからログデータを取得し、制御履歴レポートを作成できることを確認した。

第5.3節 ミッションを達成するためのシステム試験

MV1 着地衝撃試験

目的

- CanSatが着地時に衝撃を受けてもコンポーネントが正常に動作することを確認する。

試験内容

- パラシュートの終端速度は、RV5より6 m/s以下である。6 m/sで着地した時の衝撃を再現するためにパラシュートを搭載した機体を実際に投下する。投下、着地後に、機体の破損の有無、全センサ、モータが正常に動作するかを確認する。

試験結果

- パラシュート開傘試験の際の動画から、CanSatが着地時に衝撃を受けてもコンポーネントが正常に動作することが分かる。パラシュート開傘試験の際の動画のリンクを再度以下に示す。

試験動画：<https://youtu.be/viCvDw1KJlo?si=Y7JjP0SkW2m7-PtD>

結論

- CanSatが着地時に衝撃を受けてもコンポーネントが正常に動作することを確認できた。

MV2 梱包材展開&パラシュート分離試験

目的

- パラシュートが機体から分離できることを確認する。

試験内容

- パラシュートは梱包材につながっており、梱包材と機体を分離できれば、パラシュートも分離できる。梱包材を固定しているテグスをニクロム線により焼き切り、梱包材を展開する。その後、機体を前進させ、エンベロープ上部から脱出できることを確認する。

試験結果

- フライトピンが抜け、加速度センサと気圧センサによる着地判定を行った後にニクロム線を加熱することで梱包材を固定するテグスを焼き切り、梱包材の展開及びパラシュートの展開を行うことができた。その後、機体が問題なく前進できた。この試験を計3回行った。その様子を撮影した動画のリンクを次に示す。

1 回目の試験動画：<https://youtu.be/JytggVzx1wk>

2 回目の試験動画：<https://youtu.be/jgtxuv0nIzQ>

3 回目の試験動画：https://youtu.be/ToBG_X96iR4

3回とも着地判定からニクロム線によるテグスの焼き切り、梱包材の展開及びパラシュートの分離、機体の前進を問題なく行うことができていたことが確認できた。

結論

- 今回の試験によって、CanSat が着地判定をした後にニクロム線によってテグスの焼き切り、梱包材の展開及びパラシュートの分離、機体の前進を問題なく行えることが確認できた。

MV3 走行性能確認試験

目的

- CanSatの走行性能を確認し、Black Rock砂漠においてもCanSatが問題なく走行可能であることを確認する。

試験内容

- 大学付近の旭丘中央公園の砂場にてシャベルを用いて轍を模擬した凹凸を作り，走行できるかを確認する．Black Rock砂漠における車のタイヤによって作られた轍は，おおよそ幅が 20[cm]，高さが 4[cm]程であるので，このようなサイズの轍を砂場で再現する．CanSatが轍へ進入する角度は，30, 60, 90[deg]の三方向とする．実際につくった轍を以下の図5-17, 17, 18に示す．



図5-16 轍の様子 (1)

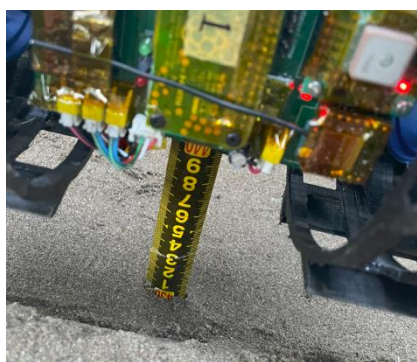


図5-17 轍の様子 (2)



図5-18 轍の様子 (3)

試験結果

- 上に示した轍に CanSat を侵入させた．侵入させる時の轍に対する角度は 30, 45, 90[deg]

の 3 通りを試した．以下にその様子を撮影した動画のリンクを示す．

進入角度 30[deg]試験動画：

<https://youtube.com/shorts/h0CfSLE1t8s?feature=share>

<https://youtube.com/shorts/gnWELU1Bzb8?feature=share>

<https://youtube.com/shorts/1x1-IX2Wm4s?feature=share>

進入角度 60[deg]の試験動画：

<https://youtube.com/shorts/PgeXpRkdAAk?feature=share>

<https://youtube.com/shorts/TsRAzc4F038?feature=share>

<https://youtube.com/shorts/aKySFxZ8tYI?feature=share>

進入角度 90[deg]の試験動画：

<https://youtube.com/shorts/omNMQvKKTAM?feature=share>

<https://youtube.com/shorts/j7W11TGxAJo?feature=share>

<https://youtube.com/shorts/SKZ3d12-0H0?feature=share>

以上の動画から、いずれの進入角度でも轍にスタックして停止することなく CanSat が走行を続けることができている。

結論

- Black Rock砂漠における轍は車のタイヤによるものに限られないが、それぞれの角度でタイヤによる轍を乗り越え走行を続けることができたことから、CanSat が轍やその他の悪路でも走行することができる基本的な走行性能が備えていることが分かった。

MV4 ロングラン試験

目的

- 全ミッションに想定される時間である3.75時間（待機1.5時間，ミッション2.25時間）の間，バッテリーから電力供給ができることを確認する．さらに，2.25時間の走行でCanSatに損傷がないことを確認する．

試験内容

- CanSat に電源を入れた状態で 1.5 時間待機させた後，旭丘中央公園において 2.25 時間走行できることを確認する．ここで，待機時間のうち最初の 0.5時間は，OBC である Raspberry Pi Zero 2Wを VNC に接続した 状態で待機する．走行試験後に機体の損傷を確認する．

試験結果

- 試験開始時刻の状態を図5-19に示す．

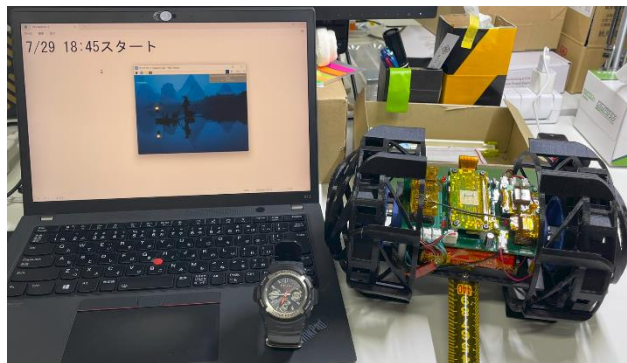


図5-19 試験開始時刻

動作を切り替えるタイミングに調査した電圧を以下の表5-1に示す．試験中にCanSatの位置を適宜移動する必要があったため，2.25時間の走行を約2.6時間に変更した．

表5-1 ロングラン試験 電圧

日時	動作	OBC [V]	Motor [V]
2024/7/29 18:45	VNCスタート	4.210	12.61
2024/7/29 19:15	VNCエンド，待機スタート	4.066	12.61
2024/7/29 20:17	待機エンド，走行スタート	4.024	12.61
2024/7/29 22:50	走行エンド，エンド	3.613	11.65

走行中における様子を以下のリンクに示す．
試験動画：

走行開始後 10分 : <https://youtu.be/OMDDYIZn02o>
走行開始後10分~40分 : https://youtu.be/sU_QgWz00vw
走行開始後40分~153分: <https://youtu.be/WZIgnplFD8Y>

ミッションの想定時間の 3.75 時間以の間、バッテリーから電力供給できることを確認できた。試験後に機体を確認したところ、走行に支障をきたす損傷は確認されなかった。

結論

- 選定したバッテリーからCanSatへの電力供給は十分に行われており、全ミッションに想定した時間の間、損傷なく走行できることが確認できた。

MV5 倒立検知試験

目的

- CanSat が着地時に倒立した場合、その状態から走行することができる状態に自律的に変化させることができることを確認する。

試験内容

- CanSatを倒立させ、加速度センサ、モータを利用して自律的に立て直して走行できるかを確認する。

試験結果

- 試験をした際の動画を以下に示す。

試験動画：

https://youtube.com/shorts/NFL5r_A8KCE?si=oytW31tNC-oRQTi8

https://youtube.com/shorts/r5iJnVn0-E?si=t2-oH-tsXY3_LYA6

加速度センサで倒立を検知しモータを利用して立て直すことができた。

結論

- 加速度センサとモータを利用して着地時に倒立した場合、それを検知して自律的に走行できる姿勢を変化可能なことを確認できた。

MV6 一次誘導試験

目的

- CanSatが着地してから一次誘導を開始し、ゴール付近に到達するまで、一連の動作が実施できることを確認する。
- 衛星画像を用いて経路設計を行い、轍等の障害物を回避する経路を設計し、ウェイポイントを抽出できることを確認する。
- GNSSセンサを用いて抽出されたウェイポイントへの誘導を繰り返し行えることを確認する。
- GNSSセンサを用いてゴールの位置座標から距離10m範囲内までの誘導をし、ゴールの位置座標から距離10m範囲内であることを検知して誘導を停止することができるか確認する。

試験内容

- 広場にコーンを設置し、この位置情報をゴール位置とする。CanSatにコーンの位置情報を与え、パラシュート分離からの誘導を開始する。CanSatは気圧センサを用いて着地判定を行い、GNSS 誘導を開始する。目視とターミナルに表示される情報からCanSatの進行方向や制御量が適切であるかを確認する。CanSatが位置情報からゴール地点と

判断して走行停止後、メジャーを用いてゴールから CanSat までの距離を測定し、GNSSセンサの誤差範囲である10m 以内であるかを計測する。この際、CanSatのOBCには、学校付近の芝生の衛星画像に画像編集ソフトにより障害物の影を合成したものをあらかじめ保存してある。CanSatはGNSSセンサから得られる自身の位置座標が画像の範囲内にある時、これに対して経路設計アルゴリズムを実施し目的地までのウェイポイントを抽出している。OBCは経路設計アルゴリズムを実施しSDカードに設計した経路、ウェイポイントが書き込まれた画像を保存する。誘導試験後、この画像を基に経路の設計によって障害物を避けたウェイポイントを抽出できているかを確認する。さらに、GNSSセンサを用いて経路設計をしたことによって抽出されたウェイポイントへの誘導を行えるかを確認する。経路設計のためにOBCに保存した衛星画像の情報と、実際に保存した画像を図5-19、20に示す。

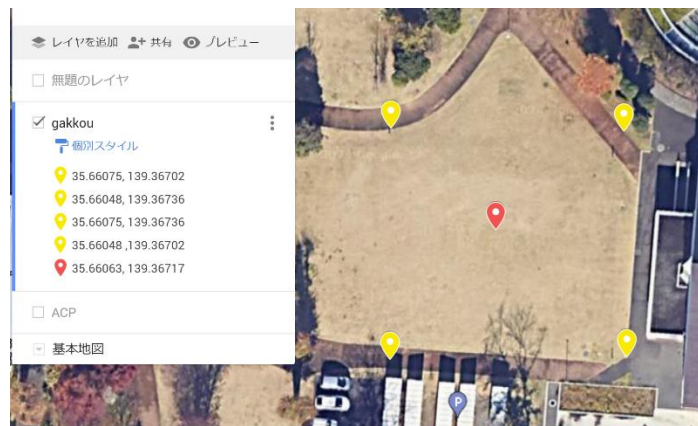


図5-19 衛星画像の情報



図5-20編集を施しOBCに保存した画像

試験結果

- 以下に試験の様子を撮影した動画のリンクを示す。

1回目： <https://youtu.be/PaM3nm280sM>

2回目： <https://youtu.be/CSOC5mk0mBY>

プログラムではCanSatのGNSSセンサが取得した位置座標が目標地点から 5m 以内の範囲に入るとモータを停止するようにしたため動画にもあるように正常にモータを停止することができたことがわかる。以下に経路設計によって出力されOBCに保存された画像を示す。図5-21は障害物を膨張させた画像であり、図5-22, 23は1回目, 2回目に経路設計アルゴリズムによって出力された経路とウェイポイントを含む画像である。



図5-21 障害物を膨張させた画像

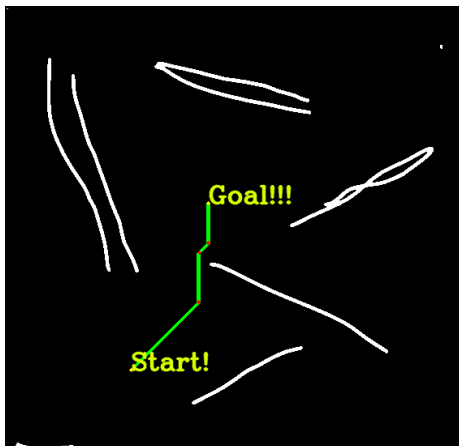


図5-22出力された経路とウェイポイント

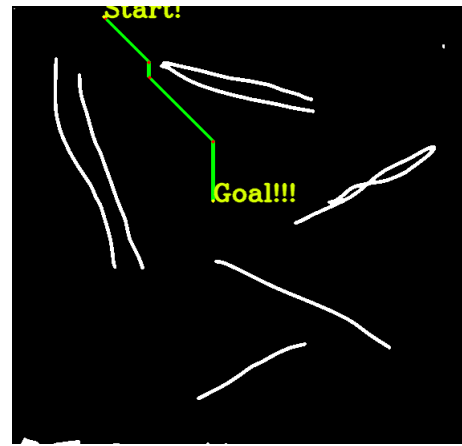


図5-23出力された経路とウェイポイント

図5-20, 21から障害物を抽出し、さらに障害物の範囲を膨張できていることがわかる。また、図5-22, 23から膨張した障害物を避けるように実際の障害物と一定の距離を保つ経路を設計し、ウェイポイント(赤点)を抽出できていることがわかる。また、動画からCanSatは経路設計アルゴリズムによって抽出されたウェイポイントまでの誘導を繰り返し行えることを確認できた。

結論

- GNSS 誘導試験において目標地点の半径 5m 以内に到達しており、CanSat が衛星画像から経路設計を行い、輻等の障害物を回避する経路を設計し、抽出されたウェイポイントを目標地点として繰り返し誘導することで、落下地点からゴール付近までの誘導が可能であることが確認できた。さらに、画像処理時に障害物を膨張化させ経路を設計することができたことから、実際のBlack Rock砂漠の画像を用いて経路設計を行うときにこの膨張程度を調節すれば、CanSatが障害物からGNSSセンサの誤差(10m)以上の距離を保つ経路を設計可能であるといえる。

MV7 ゴール判定試験

目的

- 距離センサを用いた制御により、ゴールできることを確認する。

試験内容

- 実際にモータを回した状態で機体をコーンに近づけ、距離センサの値が 6 cm以下になった地点でゴール判定をし、モータが止まることを確認する。

試験結果

- 試験の様子を以下の動画に示す.

試験動画：<https://youtu.be/6QzTA4WpRn0>

	A	B
1	89	16:00:59
2	87	16:01:00
3	84	16:01:01
4	64	16:01:02
5	49	16:01:03
6	34	16:01:04
7	21	16:01:05
8	8	16:01:06
9	4	16:01:07

図5-24 csvファイルに保存された距離センサの値

- 図5-24 と試験動画より距離センサの値が 6 cm以下の地点でゴール判定をし、モータが停止していることが確認できる.

結論

- 距離センサを用いてゴール判定をすることができることを確認できた.

MV8 二次誘導試験

目的

- 二次誘導を行いゴールに到達することを目視で確認する.

試験内容

- YOLOによる画像認識により、制御されたCanSatがゴールに近づくことを確認する.

試験結果

- 試験した際の動画を以下に示す.

試験動画：

<https://www.youtube.com/watch?v=1KAZp5mP.jbw>

<https://youtu.be/jQa2ZoLo6K4>

図5-25は誘導中にカメラから画像を取得しコーンを認識したもの、図5-26はゴール時に認識した画像である。これらと試験動画より、YOLOを用いた二次誘導が可能であることがわかった。



図5-25 誘導中にゴールを認識した画像



図5-26 ゴール時に認識した画像

結論

- YOLOによる画像認識により，制御されたCanSatがゴールに近づくことを確認することができた。

MV9 経路設計温度試験

目的

- CanSat が画像処理，経路設計を行う際にOBCの温度上昇がどの程度か確認し，連続で経路設計を行っても異常が起こらないかを確認する。

試験内容

- CanSatのOBCで経路設計アルゴリズムを3度連続で実行する．この際スタート地点を適当に変化させ異なる経路を設計させる．各経路設計アルゴリズム終了後に赤外線カメラを用いてOBCの温度を確認する。

試験結果

- 試験をした際の動画を以下に示す。

試験動画：<https://youtu.be/NI12uQjUzcQ>

動画より，経路設計を3回連続に行うことができることを確認できた．経路設計前，各経路設計後のCanSatを赤外線カメラを用いて撮影した画像を図5-27, 28, 29, 30に示す。

図より，複数の経路設計により約 $+3^{\circ}\text{C}$ の温度上昇が確認された。

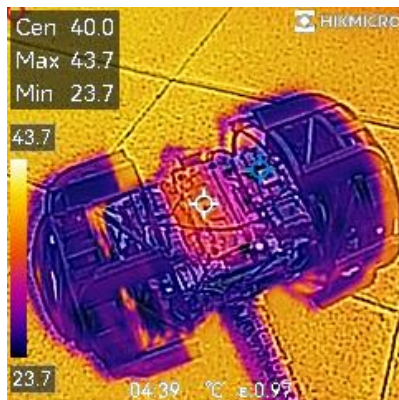


図5-27 経路設計前の温度

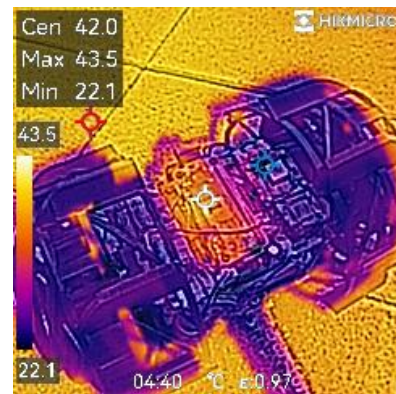


図5-28 経路設計1度目後の温度

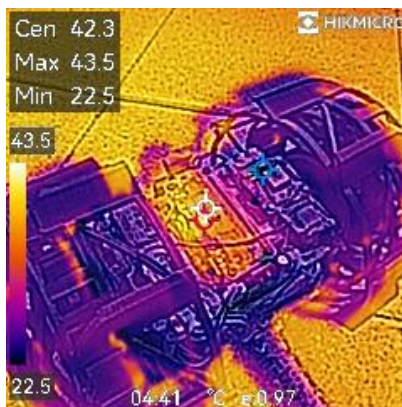


図5-29 経路設計2度目後の温度

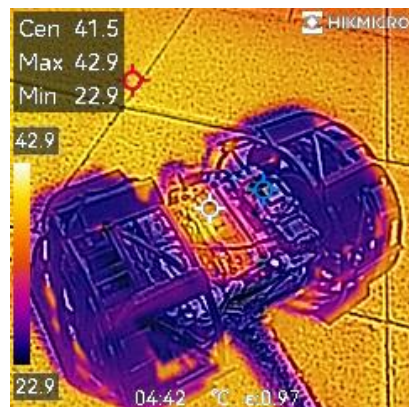


図5-30 経路設計3度目後の温度

結論

- OBC(Raspberry Pi Zero 2 W)の動作温度は $-20^{\circ}\text{C}\sim+70^{\circ}\text{C}$ であり、経路設計アルゴリズム実行により約 $+3^{\circ}\text{C}$ の温度上昇はあったものの、 $+70^{\circ}\text{C}$ に達することはなく、
CanSatの運用に支障は生じないといえる。

MV10 End-to-End試験

目的

- ロケットへの装填から打上げ後の回収までを模擬した試験を実施し、ミッションが安全に遂行されることを確認する。CanSat をキャリアから放出し投下、ミッションの実施、データの取り出しまでを本番と同じ手順で行い、各シーケンスが実施できていることを確認する。

試験内容

- CanSat投下からパラシュートの展開、目標地点へのゴール、ログの取り出しまでの一連の動作が正常に行われるかどうかの試験を行う。

試験結果

- 試験の動画を以下に示す。

試験動画：<https://youtu.be/BVzhoDznhrq>

動画から分かるように、まず CanSat はキャリアから放出されフライトピンを抜いて自由落下させたことにより、気圧センサによる着地判定が行われてニクロム線で内キャリアが展開された。その後走行を開始し、経路設計によって行いウェイポイントを抽出し、GNSS 誘導によってウェイポイントを経由し、ゴールから半径10[m]以内までの位置に到達し、そこからは画像認識を用いて終端誘導を行った。最終的にはカラーコーンに密着するところまで到達し、ゴール判定がされた。また、試験時にターミナルに出力された制御履歴を以下のリンクに示す。制御履歴から、経路設計、ウェイポイント抽出、GNSS誘導、画像認識、ゴール判定、までが正常に行われていることがわかる。図5-31、32に設計した経路とウェイポイント、ゴール判定時の画像認識を行った結果を示す。

制御履歴リンク：

https://drive.google.com/file/d/1EoKyabeRdCF9jx7ssoBAKTJk44Lb9Go0/view?usp=drive_link



図5-31 経路設計結果



図5-32 画像認識結果

結論

今回の試験では、本番同様に CanSat の放出からゴールするまでの流れを再現でき、ゴール判定まで行えることを確認した。

第6章 進捗, 予定

ガントチャートは以下のリンク先に示す.

https://docs.google.com/spreadsheets/d/12eht5dGJWDvQk4ZWjuxiFz9R9d24-dq26LQjF_WuJUU/edit?gid=887932152#gid=887932152

第7章 大会結果報告

第7.1節 目的

ミッションステートメントの設定からシステム試験までの計画・実行・評価・改善を通してプロジェクトマネジメントを経験するとともに、人工衛星開発に必要な回路設計、CADの技術能力を向上させることが本大会に参加した目的である。

第7.2節 結果

打ち上げごとに結果を記す

以下表6に1回目の打上結果を示す。

表6 1回目打上結果

項目	結果	結果判断方法
パラシュート開傘	○	目視,
放出判定	○	内部記録したログ
着地判定	×	内部記録したログ
内キャリア展開	×	目視
GNSS誘導	×	内部記録したログ
ゴール判定	×	内部記録したログ

自由落下により図7-1のように着地した。図7-2に見られるようにニクロム線にテグスが残っており、焼き切られていなかったことから、ロケットからの放出時かパラシュート開傘時の衝撃によってテグスがCanSatを包むエンベロープを切り裂いたと考えられる。

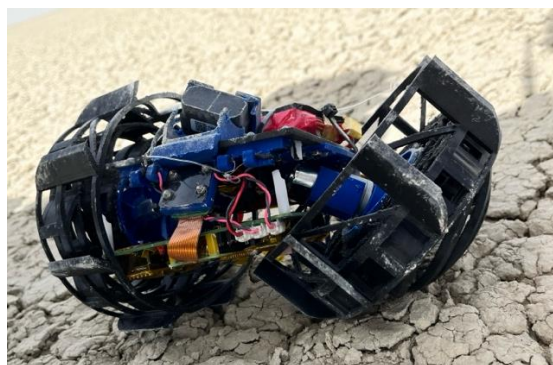


図7-1 着地した機体の写真



図7-2 ニクロム線に残るテグス

パラシュート開傘はロケットから放出された際にパラシュートが開き浮遊していることが黙して確認されたことから判断できた。

以下表7に2回目の打上結果を示す。

表7 2回目打上結果

項目	結果	結果判断方法
パラシュート開傘	○	目視,
放出判定	○	内部記録したログ
着地判定	×	内部記録したログ
内キャリア展開	×	目視
GNSS誘導	×	内部記録したログ
ゴール判定	×	内部記録したログ

1回目の打上がエンベロープのテグスを通す穴周りの強度不足による自由落下に終わったため、エンベロープの強度を上げ1回目の打上に臨んだ。結果としては1度目と同様自由落下により図7-3のように着地した。図7-3に示すのはCanSat探索時に発見した破壊されたエンベロープである。2回目の打上は二酸化炭素カートリッジによるものであったため、エンベロープの強度不足によりそれが開傘の衝撃によって破壊され自由落下に至ったと考えられる。

自由落下後もCanSatの基板には電力が供給され、センサは稼働していた。CanSatを手で持ち上げ、移動させた結果図7-4に示すように経路設計も行うことができた。

パラシュート開傘はロケットから放出された際にパラシュートが開き浮遊していることが黙して確認されたことから判断できた。



図7-3 破壊されたエンベロープ



図7-4 行った経路設計

第7.3節 考察

2回の打上の結果を表8のように評価した。

表8 サクセスクライテリア達成度

	内容	1回目	2回目
ミニマム	衛星画像を用いて経路設計をし、誘導を開始する	×	×
フル	経路設計に則った誘導により、ゴールから10m 圏内に入る	×	×
エクストラ	ゴールに接触する	×	×

打ち上げ1,2回目共に、ロケットからの放出、パラシュートの開傘のいずれかの衝撃によってエンベロープが破壊されCanSatがパラシュートと隔離され自由落下に至った。このことから2回の試行にてミニマム～エクストラを達成しなかった原因はエンベロープの強度に起因するものであるといえる。エンベロープの強度不足について準備期間に判明しなかった理由は、分離衝撃試験について試験を施したのは、CanSatと、パラシュート本体、紐、紐とパラシュートの接合部だけであり、エンベロープには分離衝撃試験を行っていないためである。この改善には、放出、パラシュート開傘の衝撃に対してエンベロープの強度が十分であるかの試験を施す必要がある。この方法としてRV8で施した試験をパラシュートだけでなく、エンベロープを巻いたCanSatに施すことが1つの解決策として考えられる。

第8章 まとめ

第8.1章 工夫点・努力した点

プロジェクト

- ・ミッション設定にあたり、ブレインストーミングの機会を設けることで様々なアイデアを出した。
- ・定期的にミーティングを設け、各々のタスク管理を行った。
- ・チーム内で問題解決に至らなかった時は、先生、先輩方に積極敵に意見を求めることで、外部からの所見を得た。

電装系と構造系に分けて以下に列挙する。

(i). 電装系

- ・基板にシルクを印刷することでコネクタの差し間違いを防止した。(図 5-10)
- ・XH コネクタや各センサの基板との接続部はセメダインスーパーXG で固定した。
- ・VNC, GitHub, VS Code の拡張機能である Remote - SSH, Samba を用いることでプログラムのバージョン管理やプログラムの実行を容易にした。
- ・プログラム作成では関数化等により可読性を向上させることを意識し、構築を行った。結果として、作成者だけでなく協力者にも同様の理解度で CanSat およびその動作プログラムを運用することが可能となった。これは実際の運用時に制御パラメータの探索等のスピード向上に生かされた。
- ・GNSS 走行では閉ループ制御を用いたシンプルな誘導システムを念頭に置いて構築を行った。その結果、GNSS 走行によるロングレンジの誘導が可能になった。
- ・GNSSセンサの誤差と位置を読み取る間隔がまばらであることを考慮した制御を作成した。
- ・PAコネクタを用いることでコネクタの取り外しを簡易的に行えるようにした。ピンセットなどで力を加えて取り外す必要が無かったのでコネクタへの負担も減ったと考えられる。
- ・OBCの電源として円筒形の18650を用いた。コンパクトでかつ充電が容易に行えることからCanSat開発において有用であった。
- ・ピンヘッドに差し込むセンサのピンに少量のはんだを付加することで差し込んだ際にピンヘッド内部で物理的な接続が確実に行われるようにした。
- ・センサの動作不良などがある場合は、まず電源を疑い、次にノイズなどを疑うようにして様々な実験を行って原因究明に努めた。具体的には、先生、先輩からのアドバイスを基に電流不足、他センサからのノイズ、OBCのクロックによってセンサに不具合が起きる可能性等を視野に入れて実験を行った。OBCの電源ピンからの電力供給には制限がある必要があるのでセンサには電源からOBCを介さずに電源供給できるとよいといえる。
- ・チーム構成人数が少なかった分、各センサの担当を決めまずそれぞれがそのセンサを使いこなせる状態にした。
- ・CanSatに用いた多くのセンサは過去に当研究室で使用され実績がある物にしたことで、センサ選定に多くの時間を割くことを免れた。
- ・画像認識開発では、最新の物体検出アルゴリズムであるYOLOを用いた開発に挑んだ。

(ii). 構造系

- ・基板をタイヤが覆うような構造にすることにより着地時に基板が直接地面に触れないようにした。(図 5-1)
- ・パラシュートのラインをサルカンで束ね、ラインの捻り対策とした。
- ・3Dプリンタを用いることで頭に浮かんだアイデアをできるだけそのまま形にすることができた。
- ・3Dプリンタの印刷時間を考え、チーム全体でうまく分担し印刷を行うことができた。
- ・機体の構造にはできるだけ軽くて強度が高いものを用いた。(胴体板にはカーボン、3D プリンタの部品は PLA のフィラメントで印刷)
- ・タイヤをTPU素材で作成することで衝撃吸収に試みた。
- ・現地での組み立てがなるべく少なくなるようにした。
- ・機体の振動によりボルトなどが緩んでしまうので、接着剤を流し込んだ。
- ・タイヤ側面の横転防止システム等、去年の結果を活かした設計を行うことが出来た。

第8.2章 課題点

- ・メンバー4人のうち2人がCanSat未経験者であり、開発初期段階において開発に費やすことになる時間、費用等を明確に伝えることができず、その結果経験者2人への負担が大きくなってしまったと感じる。ARLISS参加にあたって、未経験者がいる場合は過去資料等を用いてまずCanSatとは何か、ARLISSとは何か、について丁寧に説明を行い、開発前に大会参加に向けてチーム全体の足並みをそろえる必要があると感じた。さらに経験者は未経験者に新人教育を入念に行うことによって、未経験者が後に自律的に開発に取り組める状態に如何に早く持っていけるかが、開発期間が短いARLISSでは重要であると考えた。また、メンバーによってARLISSへの意欲に差異があり、これが時にメンバー間の関係に綻びを生じさせたと感じる。メンバーの開発への意欲を操作することはどうしても難しいことではあるが、チームメンバーが良好な関係であればこれを互いに引き上げることができると考えられるので、レクリエーション、食事会などを通して関係をまず築き上げることも必要なプロセスであると考えられる。最後に、メンバーのモチベーションへの意欲が低かったように感じられた。なので、開発計画はメンバー全員で立てるべきである。メンバーの個人的な予定を考慮しやすい上に、各メンバーの当事者意識を高められると考えられるからである。
- ・CanSat未経験者として、何から手をつければ良いのか、どのような工夫をすれば良いのかなど全てが手探り状態で、経験者のメンバーに教えてもらうことが多く負担をかけてしまった。経験者がメンバーにいて、何かあったら経験者に聞けば良いという甘えが出てしまったと思う。経験者を活かすためにも未経験者が能動的に自分で挑戦することが重要であると感じた。
- ・エンベロープについてテグスを通る穴はただ穴を開けただけにしてしまっていたので、ハトメや保護テープなど強度を増加させるような工夫が必要であると考えられる。

第8.3章 今後の展望

半年間という短い期間ではあったがミッション達成に向け努力を重ね、実際に手を動かし「ものづくり」を体験する非常に有益な機会であった。本プロジェクトを通して培った研究開発に取り組む姿勢をもって今後の研究活動に取り組んでいきたい。機会があれば今年のCanSatをブラッシュアップさせて再度ARLISSに出場したい。

ARLISSを通して、限られた時間・お金の中でどうしたらより良いものを作るかについて考える経験をすることができた。これから先の研究や仕事においてこの経験を活かしながら、積極的で有益な活動を行っていきたい。