

# ACTS 報告書

提出日：2021年 12月 26日

- チーム情報

CanSat チーム名	慶應義塾大学 Keio Team Wolve'Z
CanSat チーム 代表者	仲村美幸 nmiyuki73@keio.jp, 080-2213-6414
UNISEC 団体名	慶應義塾大学 高橋研究室
UNISEC 団体 学生代表	仲村美幸
責任教員	高橋正樹 takahashi@sd.keio.ac.jp, 090-3573-4005

- メンバー

役割	名前 (学年)
PM	仲村美幸 (M1)
機体開発	加地信一郎 (M1)
機体開発	岡本朔弥 (M1)
機体開発	吉成萌夏 (B4)
プログラム統合	木村晃 (M1)
センサ開発	井上柚乃 (M1)
センサ開発	大久保拓真 (M1)
センサ開発	高橋実宏 (B4)
回路製作	福井稔基 (B4)

- CanSat の製作目的・大会参加理由

我が研究室が CanSat を製作する目的は、チーム開発を通して協調性と技術力を挙げることである。そして、製作した CanSat で設定したミッションを成功させるため、本大会に参加した。

# 目次

第1章	3	
1.	3	
2.	4	
第2章	7	
第3章	8	
1.	8	
2.	9	
第4章	10	
1.	10	
2.	12	
3.	16	
4.	18	
第5章	18	
第6章	26	
1.	26	
2.	45	
第7章	60	
各担当 (ハード・ソフト・全体などの進行状況を記入)		11
第8章	61	
1.	61	
2.	<b>エラー! ブックマークが定義されていません。</b>	
3.	65	
第9章	66	
1.	66	
2.	67	
3.	68	

# 第1章 ミッションについて

## 1. ミッションステートメント（ミッションの意義と目的）

### 永久影探査支援のための受信信号強度を用いた他己位置推定 （CanSat 座標系における探査ローバの相対測位）

現在、NASA を中心に有人月面探査を目的としたアルテミス計画が立てられている。この計画に伴い、ロケットの燃料や人の生活資源としても利用される水資源の需要増大が予想される。しかし、全ての水資源を地球から月へ送り込むことは困難であるため、水資源を現地の月で調達することが要求される。そこで着目されているのが永久影である。永久影とは、極域に多く存在する太陽光が全く届かない領域であり、常に約-170 °Cの状態が保たれているため、水資源が蒸発せずに存在すると考えられている。実際にアメリカの研究チームは、永久影で水資源の存在を示す証拠が観測されたことを発表している。

上記の背景をもとに、今後、探査ローバによる永久影探査の需要が増大すると考えられる。しかし、課題として探査ローバの自己位置推定が挙げられる。従来の探査ローバは、エンコーダを用いた Wheel Odometry (WO) に加え、探査ローバの撮影写真と衛星写真を照合させる Visual Odometry (VO) によって補正をかけることで、自己位置推定の精度を向上させている。しかし前述したように、永久影には太陽光が全く届かない。そのため、VOによる補正が困難であり、自己位置推定の精度が低下してしまう。

そこで本ミッションでは、永久影内で探査を行う探査ローバと永久影外で活動する探査ローバ (CanSat) 間の通信技術を活用した位置推定手法を提案する。具体的には、無線通信モジュールのみを搭載した探査ローバを永久影内の任意の場所に設置する。永久影外周の複数地点において CanSat が探査ローバと通信を行い、取得した RSSI (Received Signal Strength Indicator) 値をもとに探査機までの距離を推定する。そして、CanSat が距離推定を行った位置と RSSI 値から推定された距離をもとに、CanSat 座標系における探査ローバの相対測位を行う。ただし、RSSI 値は環境に依存し、かつ不確かさをもつ値である。そこで RSSI 値の平均値と標準偏差に着目し、信頼度を設定することで RSSI 値を用いた探査ローバの相対測位の実現を目指す。

## 2. ミッションシーケンス

キャリア収納からミッション達成までの流れを Figure 1 に示す。ここで、人が行う作業を点線の枠で囲んだ。また、ミッション全体の流れは以下の 6 つのステートに分けることができる。特に、①準備と④移動から⑥測位までのミッションの概要図を Figure 2 に示す。ミッションの具体的なアルゴリズムについては第 4 章 4 節に記す。

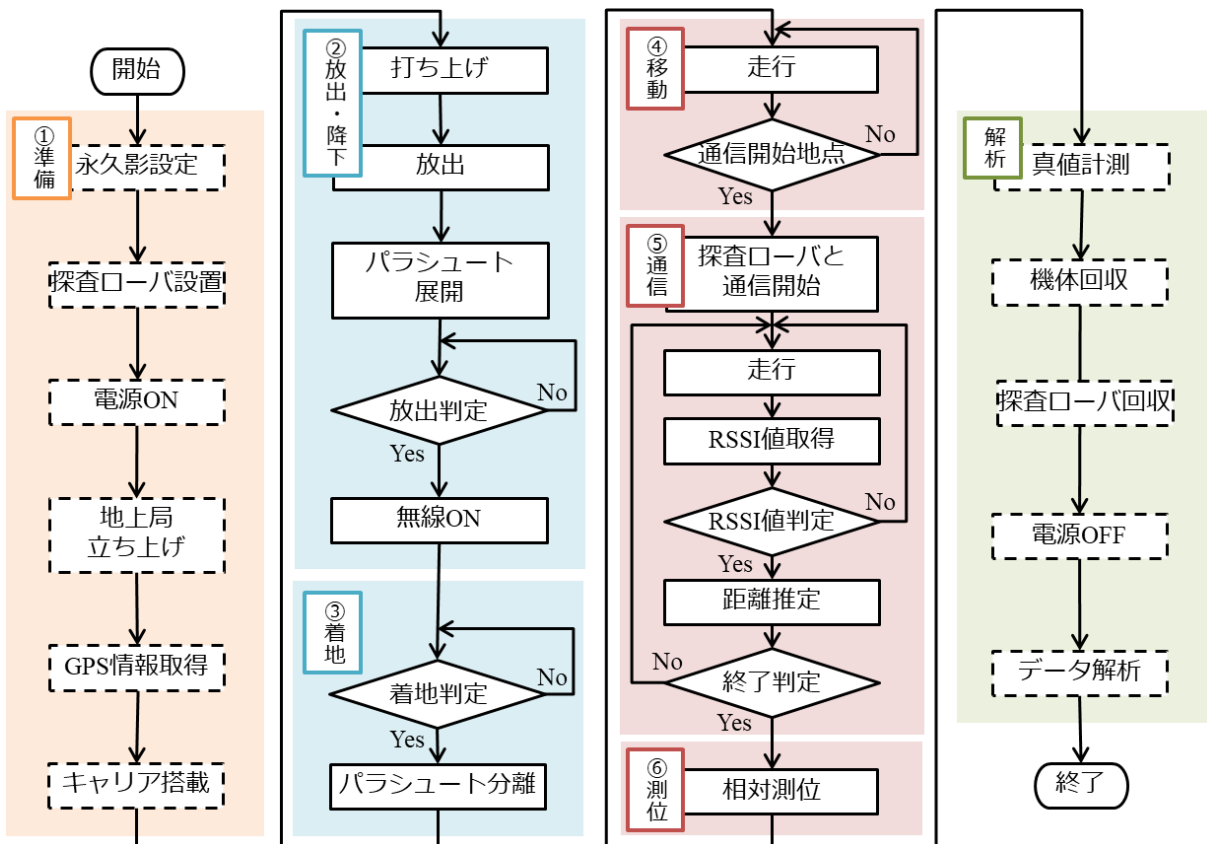


Figure 1 ミッションシーケンス

### ① 準備ステート

永久影の領域（15 m 四方）を設定し，その領域内の任意の場所に探査ローバを設置する．また，CanSat が探査ローバと通信を開始する通信開始地点を永久影の領域外に設定する．ここで，今回のミッションで想定する永久影の大きさは，実際に JAXA が探査を検討している永久影の大きさ（数十 m）に基づく．また，永久影の  $\overline{BA}$ ,  $\overline{CD}$  は北向きとし，設定した永久影に合わせて CanSat 座標系を Figure 3 に示すように定義する．

CanSat の電源をつけて，設定した永久影の領域と通信開始地点の GPS 情報を与えてからキャリアに収納し，上空で放出されるまで待機状態となる．

### ② 放出・降下ステート

キャリアから CanSat が放出された後，フライトピンを用いて放出判定を行う．一定時間（本大会では 10 分を想定）が経過した後も放出判定が行われなかったとき，次のステートへ移行する．

### ③ 着地ステート

パラシュートが開傘した後，加速度センサを用いて着地判定を行う．上記②で放出判定が行われてから一定時間（本大会では 2 分を想定）が経過した後も着地判定が行われなかったとき，次のステートへ移行する．そして着地判定に成功した後，パラシュートの分離を行う．

### ④ 移動ステート

GPS センサを用いて，事前に与えられた通信開始地点の GPS 情報をもとに，通信開始地点付近まで移動する．

### ⑤ 通信ステート

探査ローバとの通信を開始して RSSI 値を取得する．取得された RSSI 値の平均値と標準偏差の値に着目して RSSI 値判定を行う．RSSI 値の平均値と標準偏差の値が閾値以上であるとき，CanSat から探査ローバまでの距離推定を行う．これにより，中心を CanSat が測位を行った位置，半径を探査ローバまでの推定距離として，Figure 2 ⑤に示すような円を描くことができる．RSSI 値の平均値と標準偏差の値が閾値未満である場合，距離推定は行わずに次の測位地点へ移動する．ただし，RSSI 値は環境に依存する値であるため，閾値は場面ごとに設定する．

永久影外周の複数地点において，上記の距離推定を繰り返す．そして，測位回数が上限回数に到達した場合，終了判定が行われる．

### ⑥ 測位ステート

Figure 2 に示すように，複数地点で生成された円周が最も重なっている部分 (×) を探査ローバの推定位置とみなし，CanSat 座標系における探査ローバの推定座標  $x_{Est}$  を求める．誤差の評価方法はエラー! 参照元が見つかりません。に示す．

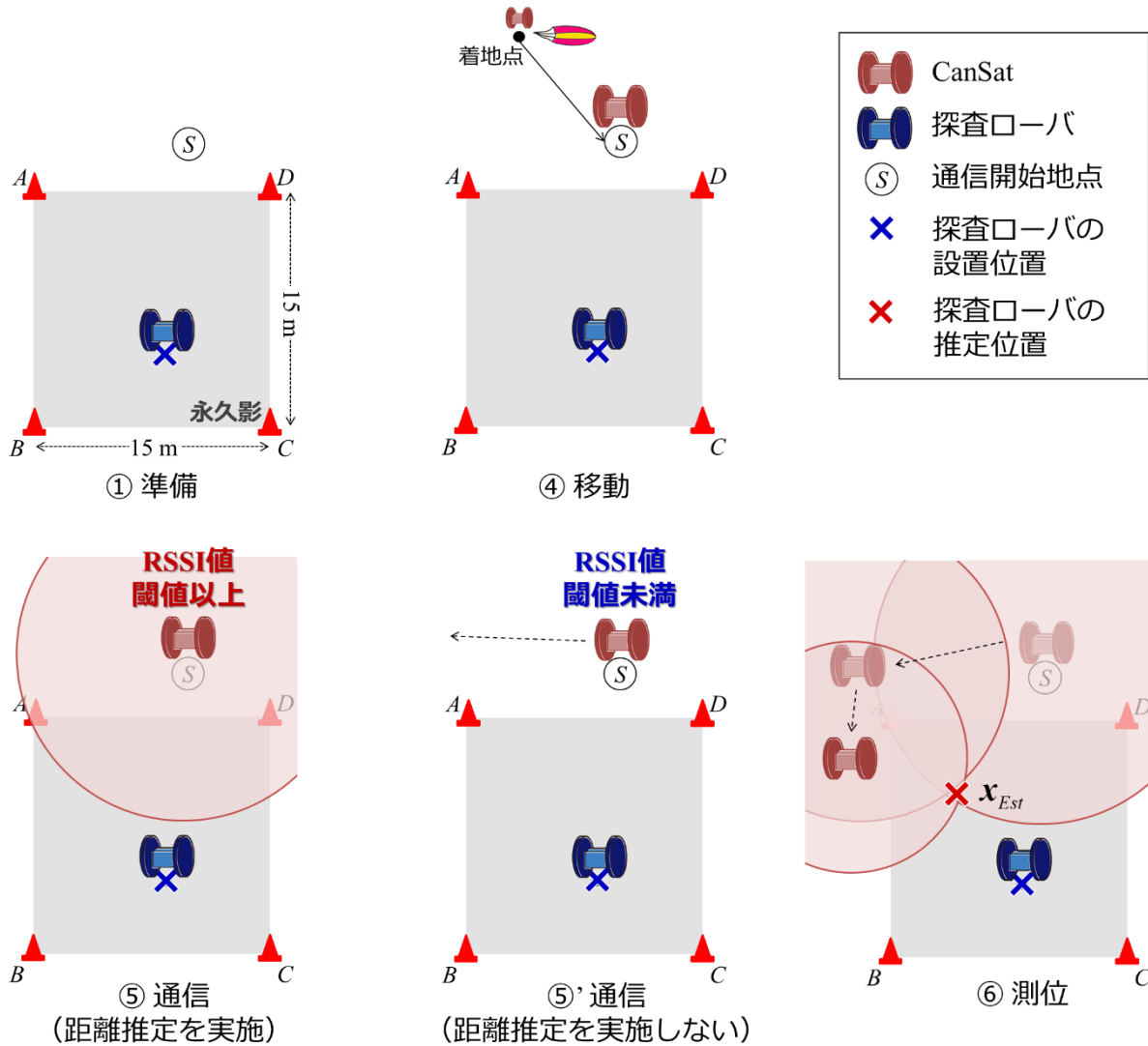
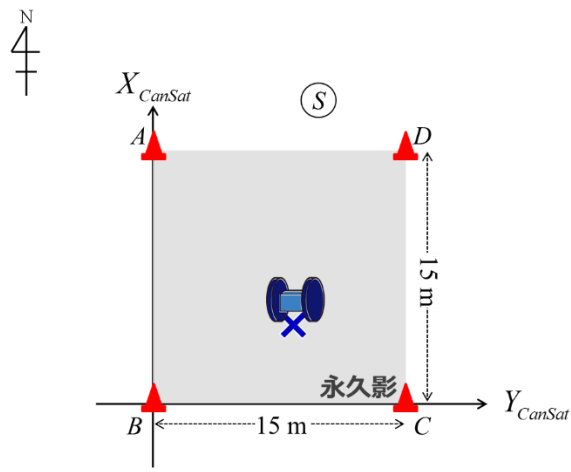


Figure 2 ミッション概要図



## 第2章 サクセスクライテリア

ミニマムサクセス	通信開始地点付近へ移動し、 探査ローバとの通信を開始して RSSI 値を取得
フルサクセス	探査ローバの位置を推定（誤差距離 5 m 以内）

サクセスクライテリアの評価方法は下記の通りである。

- ミニマムサクセス
  - 制御履歴から探査ローバと通信を行い、RSSI 値を取得できているか確認する。
- フルサクセス
  - CanSat の測位終了地点を基準として探査ローバまでの推定距離  $L_{Est}$  と推定角度  $q_{Est}$  を算出する。
  - 真値を求めるために、実際にメジャーとコンパスを用いて探査ローバまでの距離  $L_{Real}$  と角度  $q_{Real}$  を計測する。
  - 次式に示す余弦定理より誤差距離  $L_{Error}$  を算出し、誤差距離  $L_{Error}$  が閾値 5 m 以内であるか評価を行う。

$$L_{Error} = \sqrt{L_{Est}^2 + L_{Real}^2 - 2L_{Est}L_{Real} \cos(q_{Est} - q_{Real})}$$

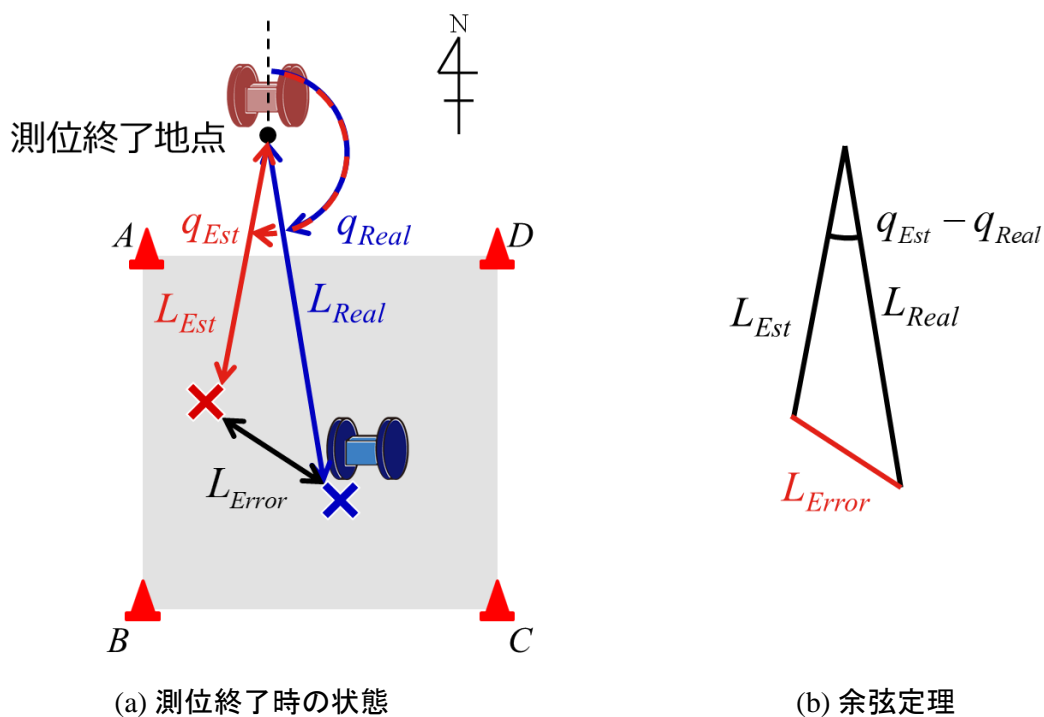


Figure 4 評価方法

### 第3章 要求項目の設定

#### 1. システム要求（安全確保、レギュレーションのための要求）

要求番号	自己審査項目
R1	半径 146 mm, 全長 240 mm のキャリアに収納可能であること
R2	重量が 1050 g 以下であること
R3	ロスト対策を実施しており, 有効性が試験で確認できること
R4	記録媒体にセンサの値が保存できること
R5	肉眼で確認可能な誤差半径内で CanSat の位置情報が取得できること
R6	電源が入れられること
R7	電源 ON を確認できること
R8	キャリア内で通信機能が停止すること
R9	発射時の準静的荷重 10 G に耐えられること
R10	上昇時の振動 15 GRMS に耐えられること
R11	放出時の衝撃 20 G に耐えられること
R12	キャリアから自重で落下可能であること
R13	キャリアからの放出を検知可能であること
R14	放出検知の後, CanSat の無線通信を開始可能であること
R15	無線通信を指定された周波数に変更できること
R16	開傘衝撃 12 G に耐えられること
R17	パラシュートが開傘できること
R18	パラシュートで 6 m/s まで減速できること
R19	着地衝撃に耐えられること
R20	CanSat の収納, 投下の準備を 5 分以内で行うことができること



## 2. ミッション要求（ミッションを実現するにあたり要求される性能）

要求番号	自己審査項目
M1	探査機の電源が入れられること
M2	通信開始地点の GPS 情報を認識すること
M3	ミッション遂行に十分な電力を供給できる電源を有すること
M4	設定した永久影（15 m 四方）の 4 頂点の GPS 情報を認識すること
M5	パラシュートに覆われても脱出できること
M6	着地を検知できること
M7	分離指令により、パラシュートを分離できること
M8	CanSat の姿勢を検知できること
M9	反転・横転したとき復帰できること
M10	回路基板が機体上部にくるように姿勢を変更できること
M11	スタック対策を行っており、走行が困難な場所でも走行できること
M12	GPS 情報に基づいて通信開始地点へ移動できること
M13	永久影内の探査機と双方向に通信が行えること
M14	RSSI 値を取得できること
M15	1 度通信が途切れても、再度通信を再開できること
M16	エンコーダを用いて移動距離を推定できること
M17	加速度センサを用いて姿勢を推定できること
M18	永久影内に侵入せず走行できること
M19	RSSI 値に基づいて探査機との相対距離を推定できること
M20	複数地点での測位により、探査機の位置を推定できること

## 第4章 システム仕様

### 1. CanSat 外観

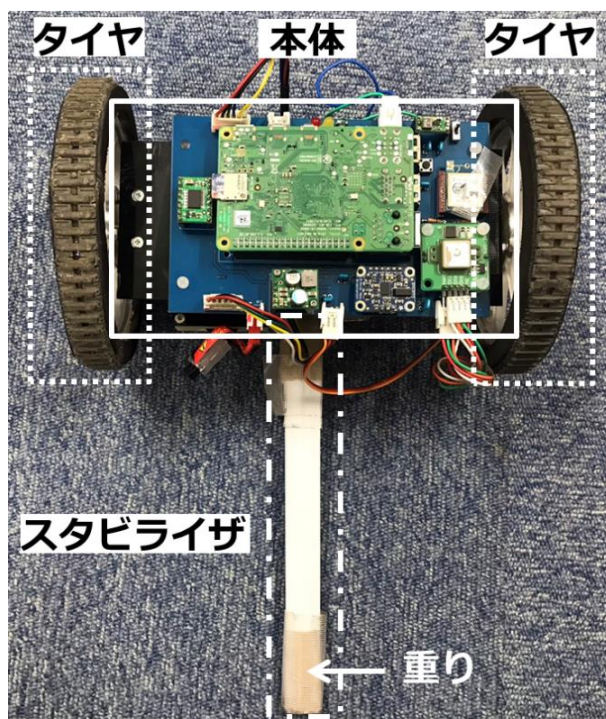
CanSat 外観を Figure 5 に示す。CanSat は永久影外周を 2 輪走行して相対測位を行う。また、CanSat は本体、タイヤ、スタビライザの 3 つのパーツに分けることができる。タイヤはスタック対策のため表面が凹凸な形状となっている。スタビライザは、姿勢を安定させるために CanSat の後方に取り付けており、先端には重りを接着している。また、CanSat の本体の機構及びセンサ類に関しては、本章の 2 節で詳細を説明する。

また、CanSat の半径と全長を計測した際の様子と実際に計測した値をそれぞれ Figure 6, Table 1 に示す。



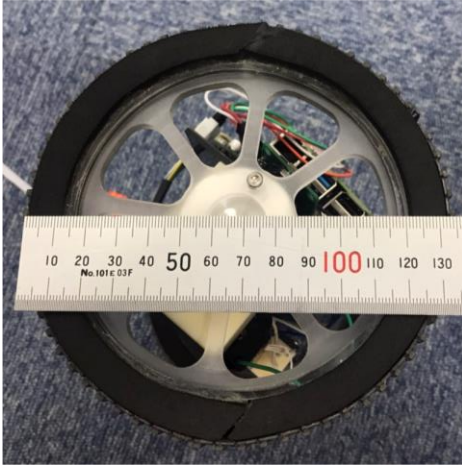
(a) 前方

(b) 後方

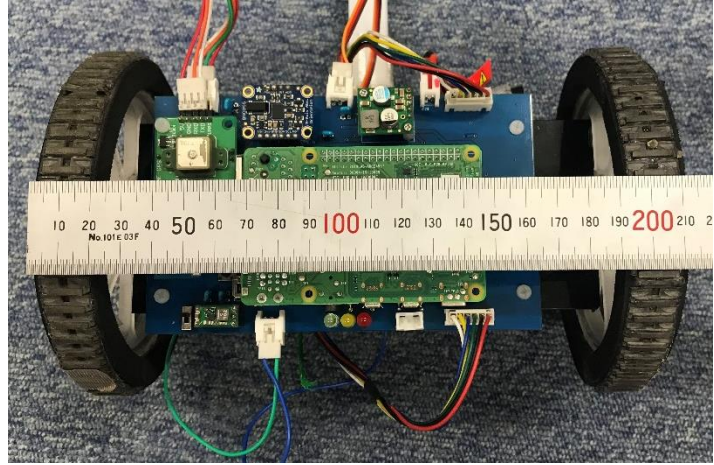


(c) 上方

Figure 5 CanSat 外観



(a) 半径



(b) 全長

Figure 6 CanSat 計測時の様子

Table 1 CanSat の計測値

半径	133 mm
全長	212 mm



## 2. CanSat 内観・機構

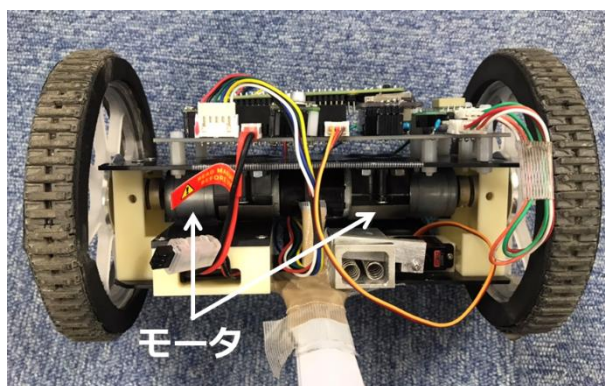
### A) 基本構造

Figure 7, Figure 8に示すように、CanSatの本体は回路基板、モータ2個、モータ用電源、回路用電源が搭載されている。本体の上板の部分に回路基板とモータが取り付けられており、下板の部分にモータ用電源と回路用電源が取り付けられている。モータ用電源はリチウム・ポリマー電池のSIGP 1050-2S1P-7.4V-20C、回路用電源はリチウム・イオン電池のKEEPPower 18650を使用する。

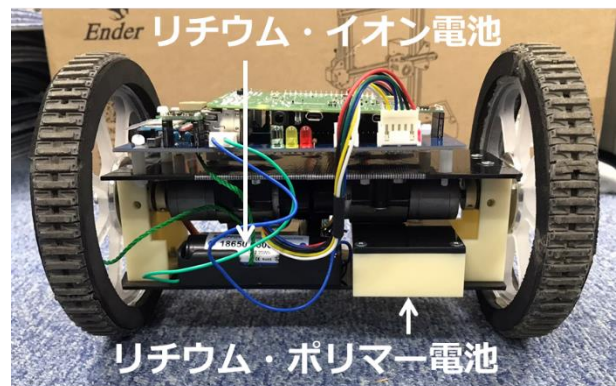
次項以降で各機構の詳細を説明する。



Figure 7 CanSat 上部



(a) モータ

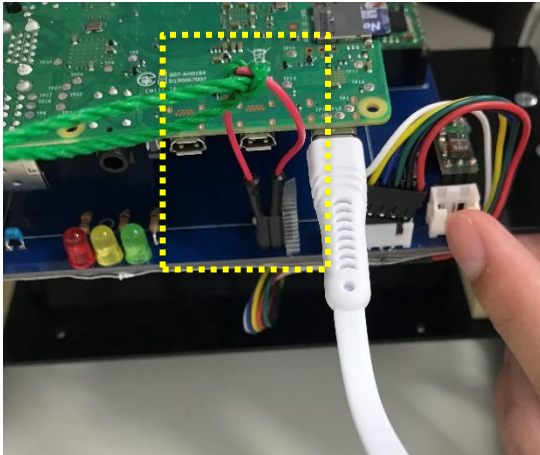


(b) モータ用電源と回路用電源

Figure 8 CanSat 側面

## B) 放出検知機構

フライトピンを用いて放出検知を行う。Figure 9 (a) に示すように、先端にフライトピンが取り付けられている紐をパラシュートの裾に結び付ける。そしてフライトピンは、Figure 9 (b) に示すように、回路基板のコネクタに取り付ける。実際にパラシュートが開傘すると、紐が引っ張られて回路基板のコネクタからフライトピンが抜ける。このとき、Raspberry Pi 4 Model B のGPIO ピンにかかる電圧が変化して放出を検知する仕組みとなっている。



(a) フライトピンの設置の様子



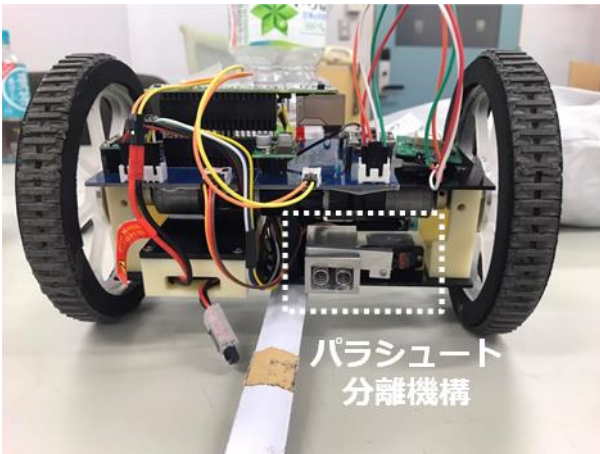
(b) パラシュートに結び付けられたフライトピン

Figure 9 放出検知機構

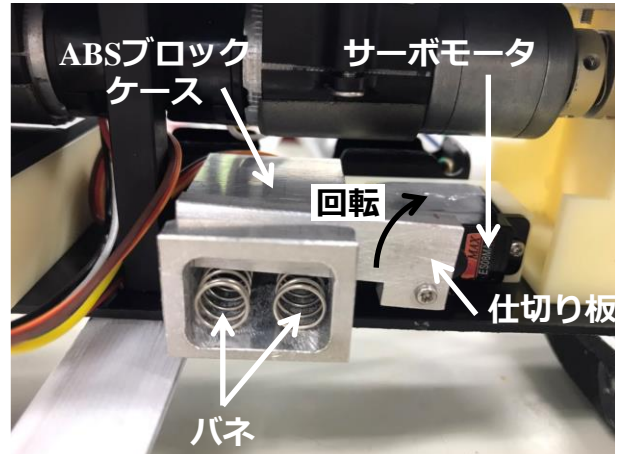


### C) パラシュート分離機構

サーボモータを回転させてパラシュートの分離を行う。CanSat 後方右下がパラシュート分離機構 (Figure 10 (a)) となっており, Figure 10 (b) に示すようにパラシュート分離機構は ABS ブロックケース, バネ, 仕切り板, サーボモータからなる。ABS ブロックケース内のバネを押し込む形で, パラシュート先端の ABS ブロック (Figure 10 (c)) を挿入し, パラシュートを装着する。そして着地判定が行われた後, マイコンから指令を送ってサーボモータを回転させると同時に仕切り板も回転させる。このときバネの復元力によって ABS ブロックが放出され, パラシュートを分離する仕組みとなっている。



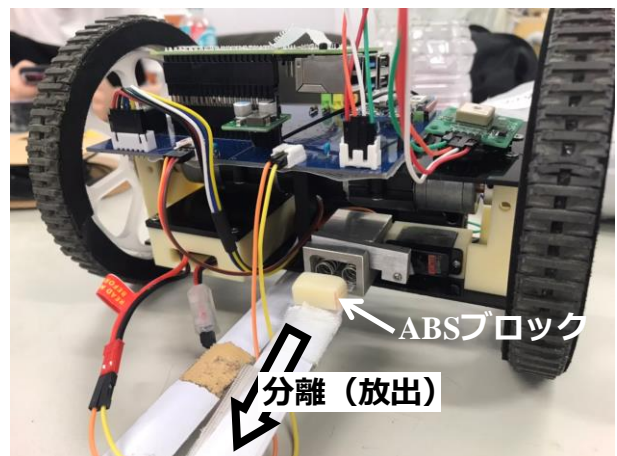
(a) CanSat 後方



(b) パラシュート分離機構



(c) ABS ブロック (パラシュート)



(d) パラシュートの分離の様子

Figure 10 パラシュート分離機構

#### D) 着地判定機構

加速度センサを用いて着地判定を行う。キャリアから放出されて空中にいる間、CanSat は落下しているため加速度センサの値は大きく変化する。そして CanSat が着地すると、地面に静止した状態となるため加速度センサの値が 0 近くになる。この状態がある一定時間続いた場合に CanSat が着地したと判定する。

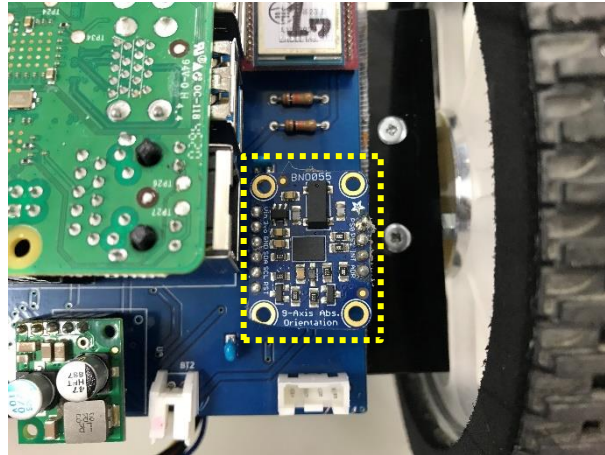


Figure 11 着地判定機構（加速度センサ）

### 3. システム図（CanSat 搭載計器仕様一覧）

システム図・使用センサー一覧を Figure 12, Table 2 に示す。また、モータ、サーボモータ、電源以外のセンサー仕様書についてはそれぞれ添付する。

Figure 12 において、青矢印は信号の入出力、橙矢印は電力の関係を表している。また、電源①はリチウム・ポリマー電池、電源②はリチウム・イオン電池を使用している。リチウム・ポリマー電池（電源①）はモータ用電源であり、モータとサーボモータへの電源供給を行っている。一方、リチウム・イオン電池（電源②）は回路用電源であり、マイコンとセンサへの電源供給を行っている。マイコンは Raspberry Pi 4 Model B を使用しており、GPS センサや加速度センサから得られる値、また無線通信モジュールで受信された RSSI 値を入力として処理を行い、CanSat の状態を認識する。そしてモータとサーボモータの制御や、無線通信モジュールで地上局と探査ローバに向けたデータの送信を行う。ただし、GND はすべて共通しており接地されている。

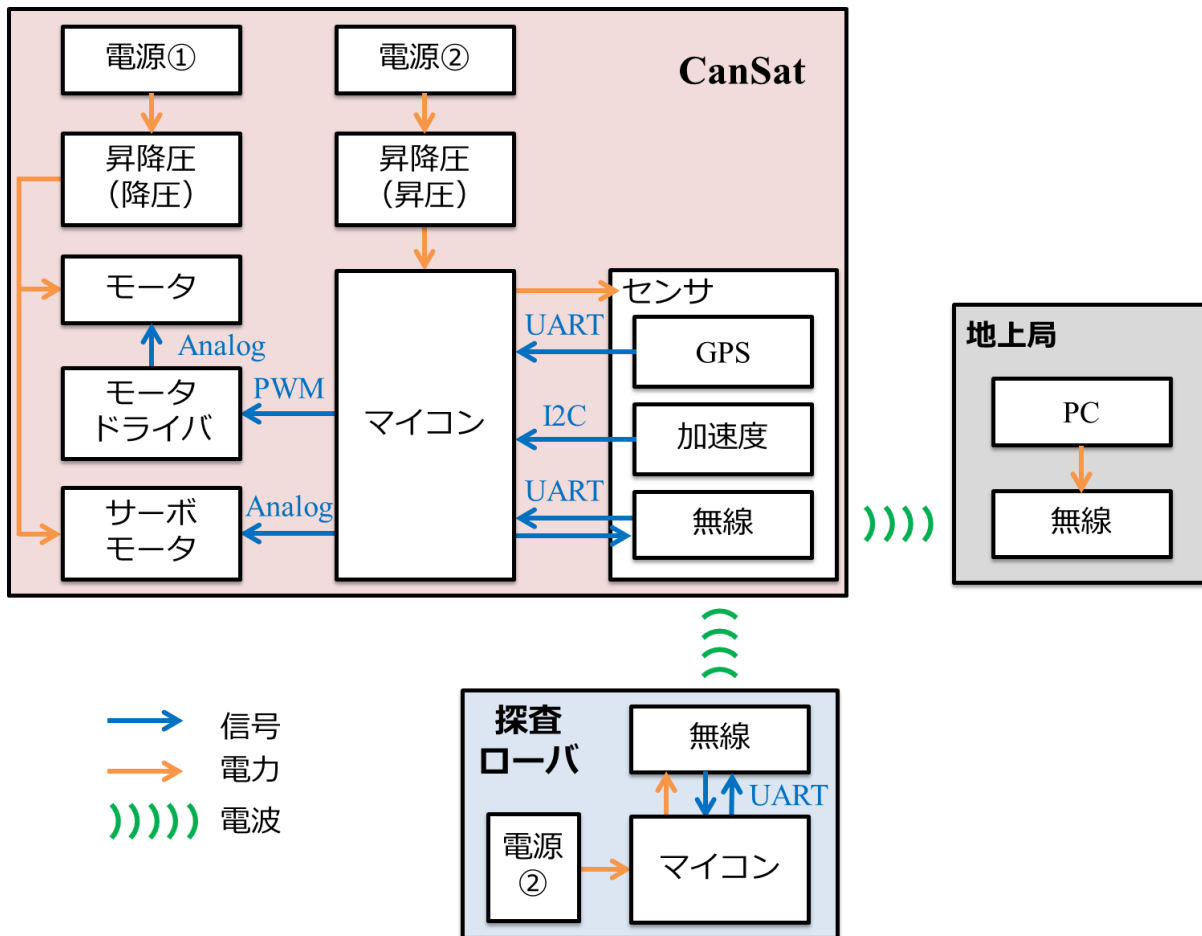


Figure 12 システム図



Table 2 使用センサ・モーター一覧

機器	型番	使用用途
マイコン	Raspberry Pi 4 Model B	入出力値の処理 SDカードへの記録
電源① (リチウム・ポリマー電池)	SIGP 1050-2S1P-7.4V-20C 7.4V 1050mAh	モータ, サーボモータへの 電源供給
電源② (リチウム・イオン電池)	KEEPOWER 18650 3.7V 3500mAh	マイコン, センサ, 無線通信モジュールへの電源供給
昇降圧	TPS61230A	電圧の昇圧
	D36V28F6	電圧の降圧
サーボモータ	EMAX ES08MA II	パラシュートの分離
モータ	C1S605800014503	走行時の動力
モータドライバ	TB6612FNG	モータへの指令
GPS センサ	GYSFDMAXB	時刻, 緯度, 経度の取得
9軸加速度センサ	Bno055	加速度の取得
無線通信モジュール	ES920LR	地上局との通信, RSSI 値の取得

#### 4. アルゴリズム

ミッション開始から終了までのアルゴリズムのフローチャートは、第1章2節のFigure 1に示しているが、④移動と⑤通信に関する詳細なフローチャートをFigure 13に示す。

本節では、ミッションシーケンスに沿ってアルゴリズムの詳細を説明する。

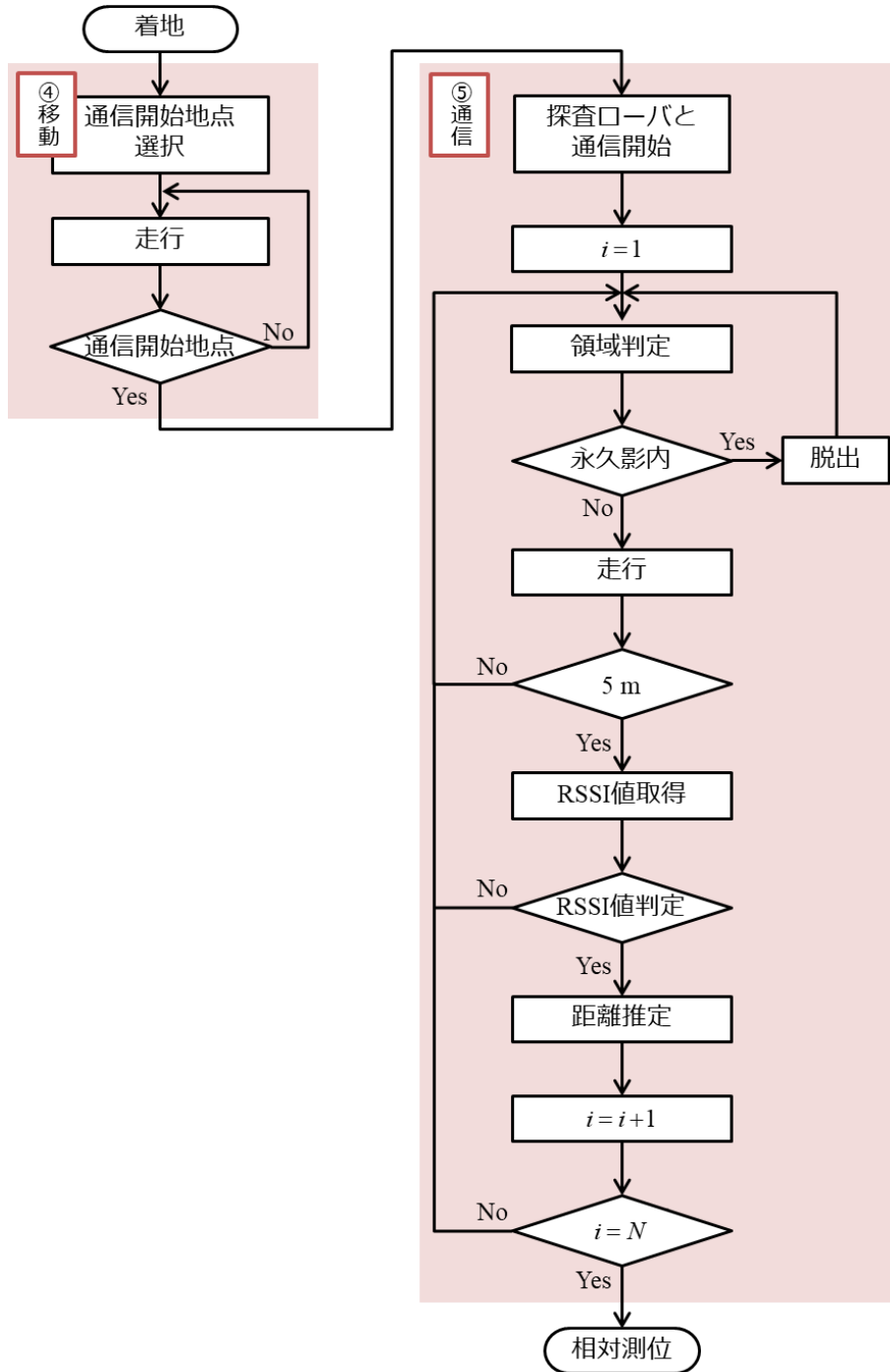


Figure 13 ミッションシーケンス（移動・通信）

① 準備ステート

第 1 章 2 節で定義した CanSat 座標系に対して, Figure 14 に示すような 4 つの通信開始地点 ( $S_{AB}, S_{BC}, S_{CD}, S_{DA}$ ) を設定する.

プログラムが実行されてから一定時間 (本大会では 50 秒を想定) が経過すると, CanSat がキャリアへの収納を検知して無線通信を停止する.

② 放出・降下ステート

キャリアから CanSat が放出されてパラシュートが開傘すると, 回路基板からフライトピンが抜けてマイコンの GPIO ピンにかかる電圧が変化する. この電圧変化を検知することで放出判定が行われる. ただし, プログラムが実行されてから一定時間 (本大会では 10 分を想定) が経過した後も放出判定が行われなかったとき, 次のステートへ移行するよう設定している.

③ 着地ステート

CanSat が着地して加速度センサから取得される 3 軸加速度の合計値が, 200 制御周期連続で  $1\text{m/s}^2$  より小さいとき, 着地判定が行われる. ただし, 上記②で放出判定が行われてから一定時間 (本大会では 2 分を想定) が経過した後も着地判定が行われなかったとき, 次のステートへ移行するよう設定している. そして着地判定に成功した後, サーボモータに指令を送り, パラシュートの分離を行う.

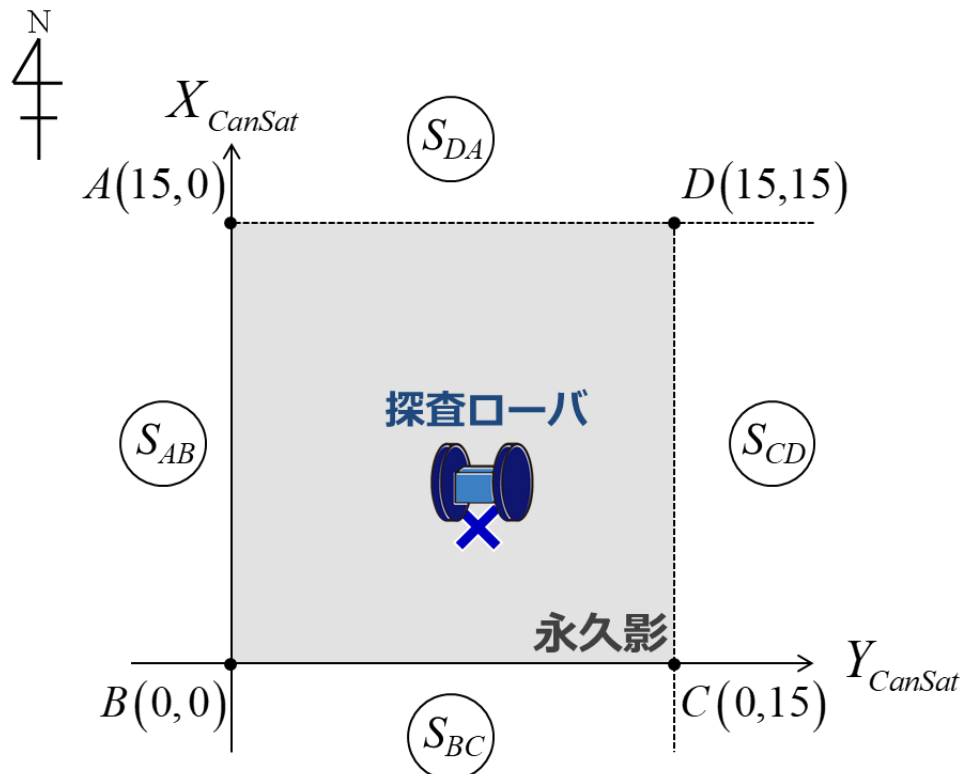


Figure 14 CanSat 座標系 と通信開始地点

#### ④ 移動ステート

Figure 15に示すように永久影外の領域を4つ（領域  $AB$ ,  $BC$ ,  $CD$ ,  $DA$ ）に分割する。GPS センサを用いて、事前に与えられた通信開始地点の GPS 情報をもとに、CanSat は最も近い通信開始地点付近まで移動する。例えば Figure 15 の場合、CanSat は着地点から最も近い通信開始地点  $S_{AB}$  へ移動する。そして通信開始領域内に到達したとき、次のステートへ移行する。ただし、上記③で着地判定が行われてから一定時間（本大会では 5 分を想定）が経過した後も通信開始地点付近へ移動できなかったとき、次のステートへ移行するよう設定している。

また、草などによってスタックした場合のため、CanSat が走行する場合は加速度センサを用いたスタック検知を行っている。3 軸加速度の合計値が 100 制御周期連続で  $1\text{m/s}^2$  より小さいときスタック判定が行われ、CanSat は回転した後に再度直進する。上記のスタック検知は⑤通信ステートにおいて永久影外周を走行する場合にも行う。

#### ⑤ 通信ステート

探査ローバとの通信を開始した後、領域判定を行い、加速度センサを用いて各領域の進行方向へ姿勢を変更する。ここで、各領域における CanSat の進行方向は Figure 15 の赤矢印（→）の方向として定義している。そして、エンコーダを用いて永久影外周を 5 m 走行する。ただし、途中で永久影内に誤って侵入してしまった場合は永久影からの脱出を行う。

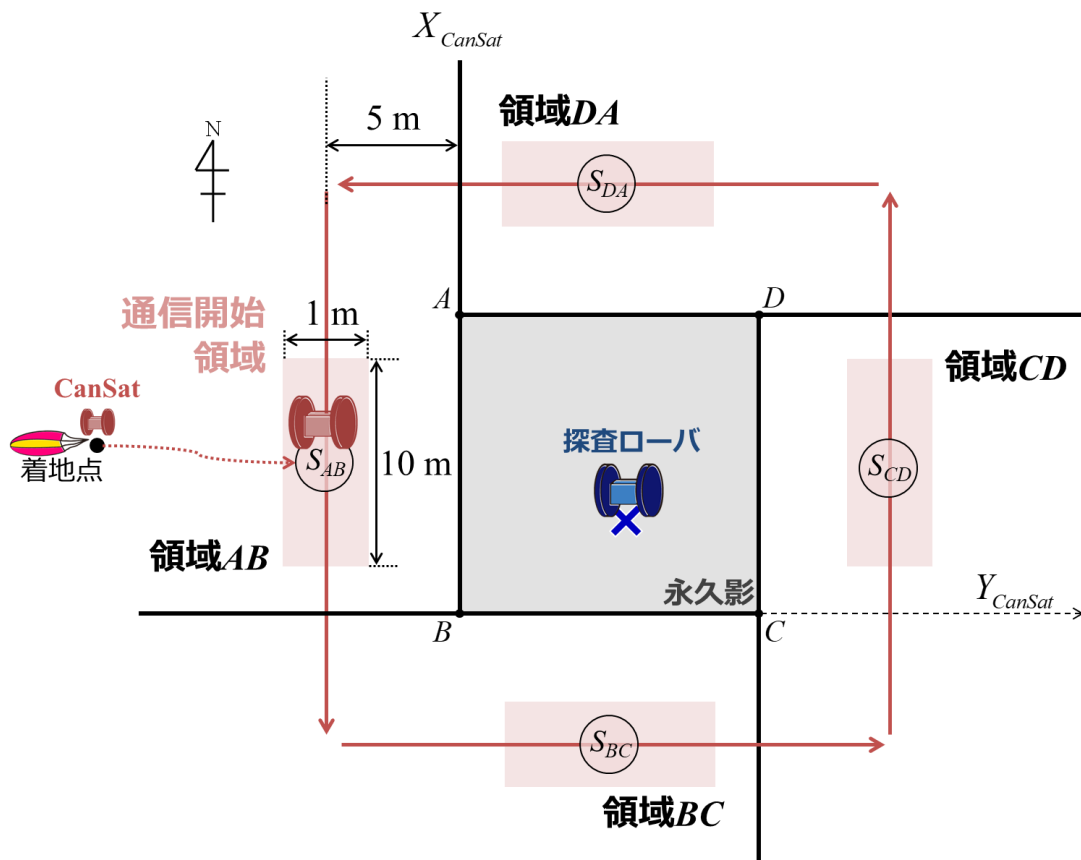


Figure 15 永久影外周の走行

5 m 走行した後、探査ローバとの通信によって RSSI 値を取得する。具体的な RSSI 値の取得方法について Figure 16 に示す。はじめに、CanSat から探査ローバへ空のデータを送信すると (Figure 16 (a))、探査ローバがデータを受信したときの RSSI 値が取得できる (Figure 16 (b))。次に探査ローバから CanSat へ、取得した RSSI 値をデータとして送信すると (Figure 16 (c))、探査ローバがデータを受信したときの RSSI 値と CanSat がデータを受信したときの RSSI 値が取得できる (Figure 16 (d))。すなわち、双方向に 1 回通信を行うと 2 回分の RSSI 値が取得できる。そして各測位地点において上記の双方向通信を 20 回行い、40 回分の RSSI 値が取得できたら RSSI 値の平均値と標準偏差の値を算出する。平均値と標準偏差の値がともに閾値以上であるとき CanSat から探査ローバまでの距離推定を行い、閾値未満であるとき距離推定は行わずに次の測位地点へ移動する。

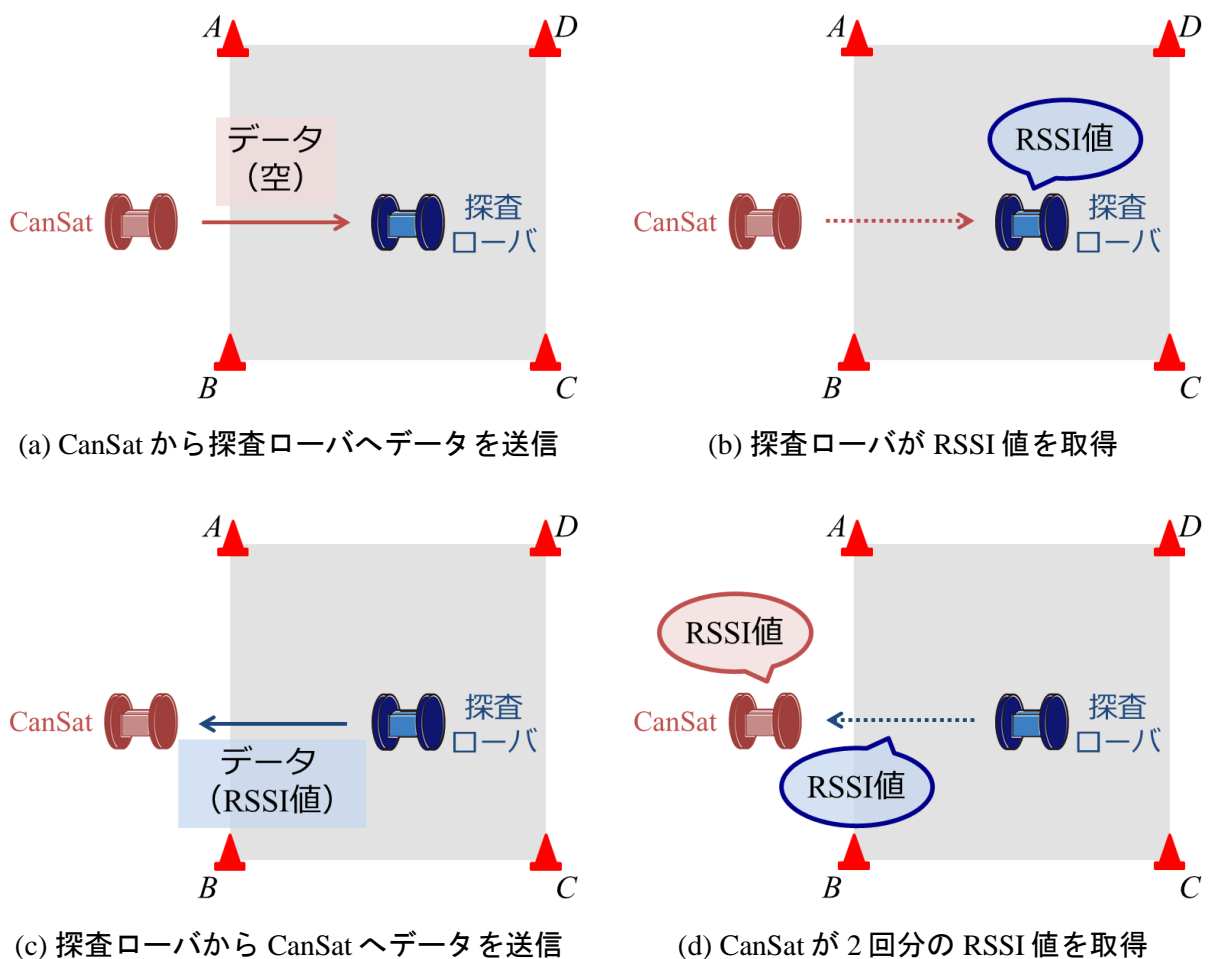


Figure 16 CanSat と探査ローバの双方向通信

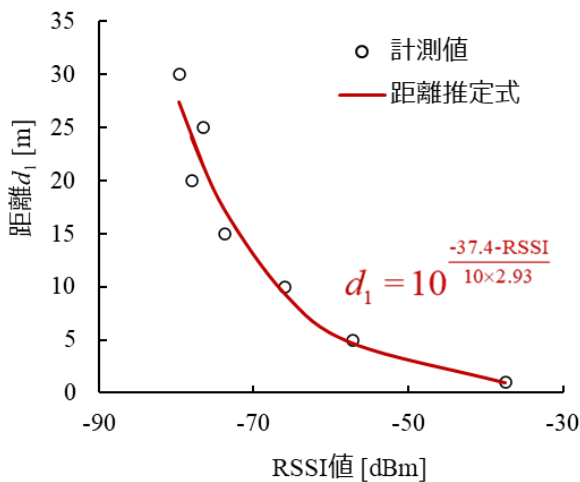
距離推定を行う際は、CanSatが受信したRSSI値から算出される推定距離 $d_1$ と探査ローバが受信したRSSI値から算出される推定距離 $d_2$ の平均をとることで推定距離 $d = (d_1 + d_2)/2$ を算出する。ここで、RSSI値と距離の関係式は次式に基づいて定義されている。

$$d = 10^{\frac{MeasuredPower - RSSI}{10N}}$$

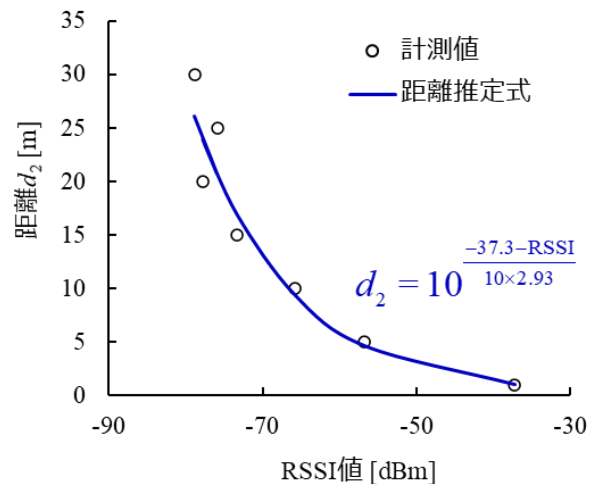
ただし、 $MeasuredPower$  [dBm]は1 mのときのRSSI値、 $N$ は定数であり、共に環境に依存するパラメータである。そこで、今回試験を行う慶應義塾大学矢上キャンパスのグラウンドでの $MeasuredPower$ と $N$ の値を算出して距離推定式を求めるため、事前実験を行った。その結果、計測したRSSI値と距離の関係はFigure 17に示す通りであり、CanSatと探査ローバが受信するときの $MeasuredPower$ はそれぞれ-37.4、-37.3であった。さらに、計測結果から近似式を求めると、CanSatと探査ローバが受信するときの $N$ は共に2.93であった。以上より、 $d_1$ と $d_2$ はそれぞれ次式に示す距離推定式に基づいて算出される。

$$d_1 = 10^{\frac{-37.4 - RSSI}{10 \times 2.93}}$$

$$d_2 = 10^{\frac{-37.3 - RSSI}{10 \times 2.93}}$$



(a) CanSatが受信したとき



(b) 探査ローバが受信したとき

Figure 17 RSSI値と距離の関係（慶應義塾大学矢上キャンパスのグラウンド）

距離推定が行われた場合、中心を CanSat が測位を行った位置  $(x_{measure}, y_{measure})$ 、半径を探索ローバまでの推定距離  $d$  として円を描くことができる。ただし 2 次元的な円の描画では、円が交わらないとき探索ローバの位置を推定することが困難である。そこで本ミッションでは、探索ローバの推定確率  $p$  を次式に基づいて算出し、Figure 18 に示すような 3 次元的な円を描画する。

$$p = \frac{1}{2} \exp \left[ -\frac{3}{2d^2} \left\{ (x_{CanSat} - x_{measure})^2 + (y_{CanSat} - y_{measure})^2 \right\} \right] \times \frac{(x_{CanSat} - x_{measure})^2 + (y_{CanSat} - y_{measure})^2}{2\pi d^2}$$

永久影外周の複数地点において、上記の距離推定を繰り返す。そして、測位回数が上限回数  $N$  に到達した場合、終了判定が行われる。

### ⑥ 測位ステート

複数地点で生成された 3 次元的な円を重ね合わせると、Figure 19 に示すような図が生成される。ここで、 $z$  の値が最も高い位置 (↓) を探索ローバの推定位置とみなし、CanSat 座標系における探索ローバの推定座標  $x_{Est}$  を求める。

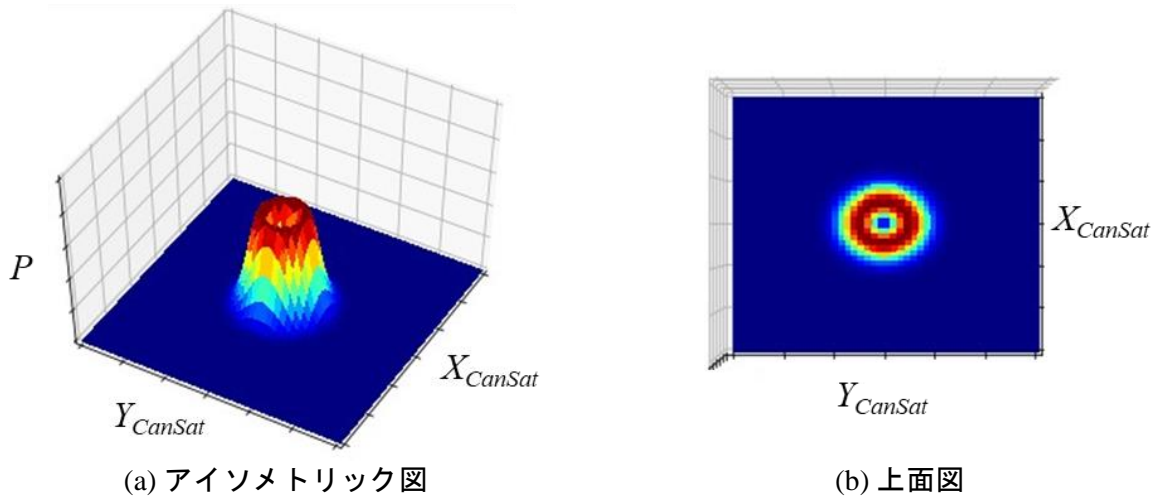


Figure 18 3次元的な円

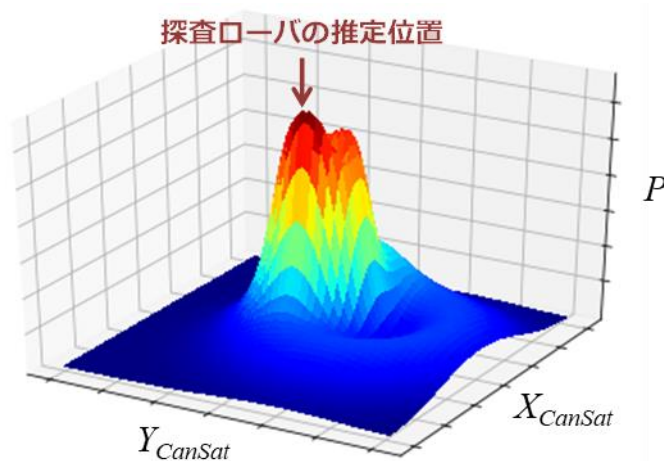


Figure 19 3次元的な円の重ね合わせ

## 第5章 試験項目設定

番号	検証項目名	対応する自己審査項目の 要求番号（複数可）	実施日
V1	質量試験	R2	7/30
V2	キャリア収納放出試験	R1, R12, R20	8/4
V3	電池試験	M3	8/20
V4	通信距離試験	R3	6/5
V5	地上局記録試験	R4	7/19
V6	センサ統合試験	R4, R5	7/14
V7	SDカード記録試験	R4	7/14
V8	GPS センサ精度試験	R3, R5	7/14
V9	加速度センサ試験	M6	7/14
V10	無線 ON/OFF 試験	R8, R13, R14	7/14
V11	準静的荷重試験	R9	8/12
V12	振動試験	R10	8/20
V13	分離衝撃試験	R11	8/12
V14	無線 CH 変更試験	R15	7/14
V15	開傘衝撃試験	R16	8/12
V16	パラシュート落下試験	R17, R18	8/12
V17	落下衝撃試験	R19, M6	8/19
V18	姿勢変更・保持試験	M8, M9, M10	8/8
V19	走破性能試験	M11	8/6
V20	走行試験	M2, M12	8/25
V21	通信試験	M13, M14, M15	7/19
V22	自己位置推定試験	M16, M17, M18	7/26
V23	相対測位試験	M19, M20	8/25



V24	End to End 試験	全て	8/25
V25	パラシュート脱出試験	M5	8/12

## 第6章 実施試験内容

### 1. システム要求を満たすための試験内容

#### (V1) 質量試験

- 目的

質量がレギュレーションを満たしていることを確認する。

- 試験/解析内容

質量計で測定を実施し、CanSat、パラシュート、ホットボンドを含めた全ての質量が、レギュレーションに記載されている質量 (1050 g) 以下であることを確認する。

- 結果

結果を Figure 20 に示す。全ての質量を測定したところ 1000 g であった。

- 結論

CanSat、パラシュート、ホットボンドを含めた全ての質量が 1050 g 以下であり、レギュレーションを満たしていることが確認できた。

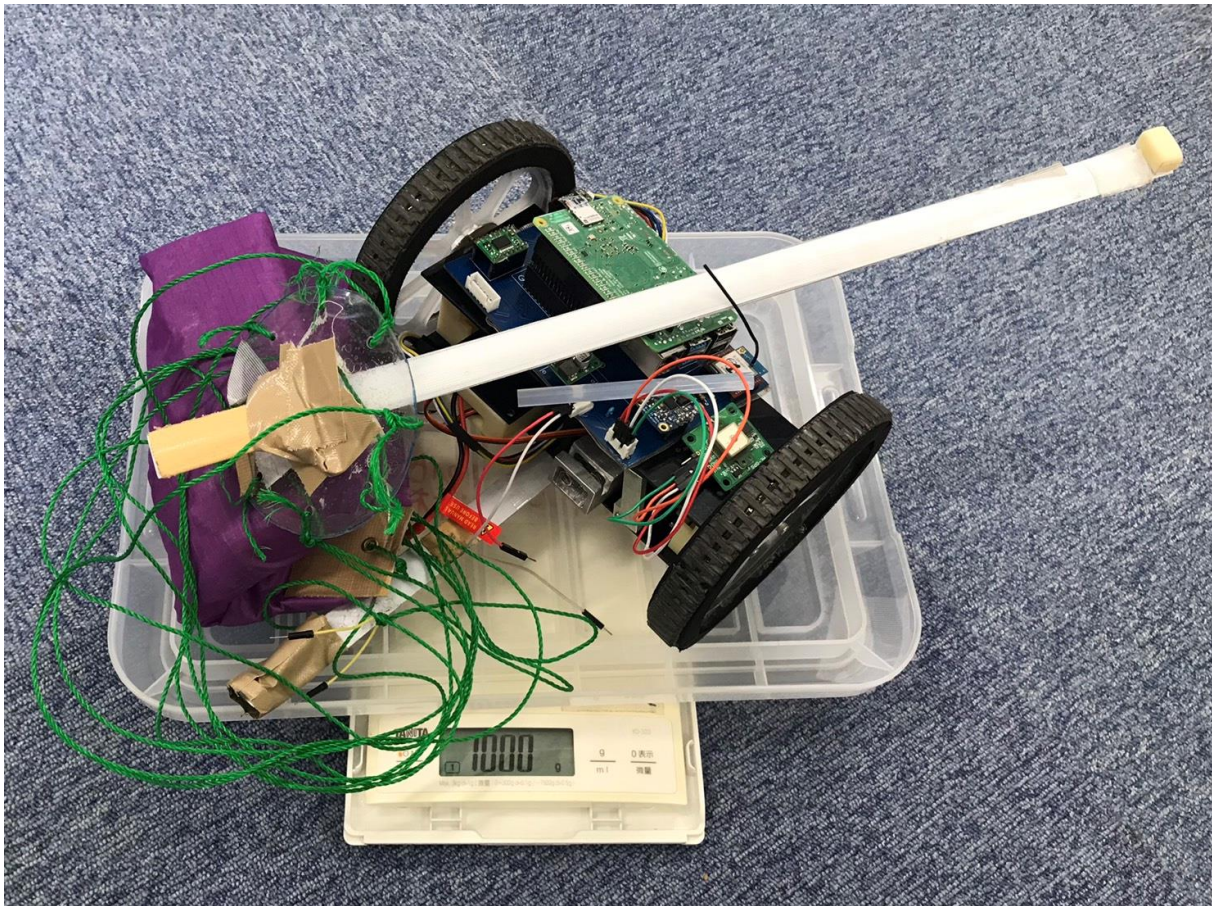


Figure 20 質量試験

(V2) キャリア収納放出試験

○ 目的

CanSat を 5 分以内にキャリアへ収納できることを確認し、その後、CanSat がキャリアから自重で落下できることを確認する。

○ 試験/解析内容

Figure 21 に示すように、キャリアの緑線の下側（内径 146 mm，高さ 240 mm）に CanSat が収納できることを確認する。また、キャリアを下向きにして CanSat がキャリアから自重で落下できることを確認する。

○ 結果

試験の動画を以下の URL に示す。

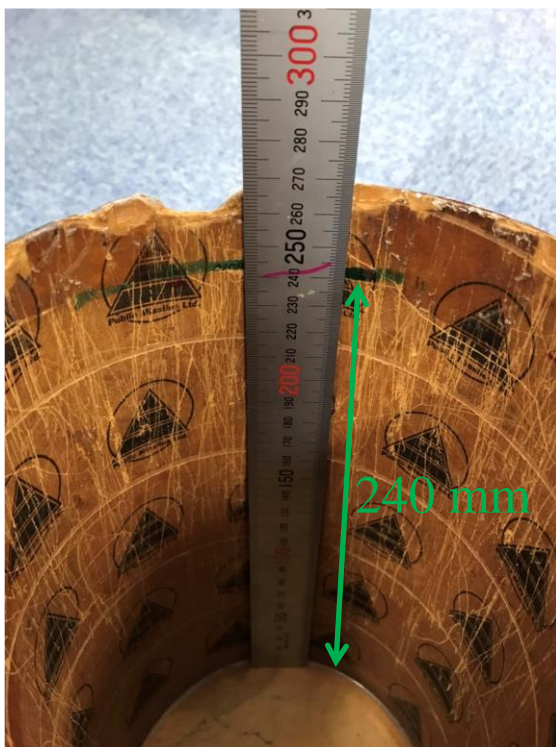
URL（1回目）：<https://youtu.be/fi5bgL5UHws>

URL（2回目）：<https://youtu.be/JIIWebgiT4s>

動画より、パラシュートを畳み始めてから CanSat をキャリアへ収納するまでの時間が 5 分以内（1 回目が 1 分 3 秒，2 回目が 51 秒）であること、さらに CanSat がキャリアから自重で落下することが確認できた。

○ 結論

CanSat を 5 分以内にキャリアへ収納できること、さらに CanSat がキャリアから自重で落下できることが確認できた。



(a) キャリア



(b) 収納時の様子

Figure 21 キャリア収納放出試験



(V4) 通信距離試験

○ 目的

ロスト対策のため、CanSat と地上局 (PC) の通信できる最大距離を測定する。

○ 試験/解析内容

地上局 (PC) と CanSat それぞれに無線通信モジュール (LoRa) を接続し、通信を行う。その後、CanSat を持って多摩川沿いを徒歩で移動し、地上局から CanSat を離していく。そして、地上局の設置地点と通信が途切れる地点間の距離を算出する。

○ 結果

結果を Figure 22 に示す。左下の青ポイントは地上局の設置地点、右上の赤ポイントは通信が途切れた地点である。実際の 2 地点の GPS 座標の値を以下に示す。

地上局の設置地点 : (35.586, 139.670)

通信が途切れた地点 : (35.577, 139.674)

以上から 2 地点間の距離を算出すると、1.05 km であった。

○ 結論

あさぎりフードパークのフィールドにおいて、ロスト対策に十分な通信距離が確保されていることが確認できた。



Figure 22 通信距離試験

(V5) 地上局記録試験

○ 目的

CanSat が地上局へ情報を正しく伝達できることを確認する。

○ 試験/解析内容

CanSat が RSSI 値を地上局へ正しく送信できているか確認する。CanSat と地上局は無線通信モジュール (LoRa) を介して通信おり、通信する際に RSSI 値が取得される。2 つの LoRa が近いとき RSSI 値は大きくなり、遠いとき RSSI 値は小さくなる。よって、CanSat と地上局の距離を変化させたときの RSSI 値に着目し、結果の妥当性を確認する。

○ 結果

試験の動画を以下の URL に示す。

URL (1 回目) : <https://youtu.be/7V0UfdGmnLA>

URL (2 回目) : <https://youtu.be/2SifE1S3FtQ>

動画より、CanSat と地上局を遠ざけると RSSI 値が小さくなり、地上局に情報を正しく伝達できていることが確認できた。

○ 結論

CanSat が地上局へ情報を正しく伝達できていることが確認できた。

(V6) センサ統合試験

○ 目的

GPS センサ, 加速度センサ, 無線通信モジュール, モータを統合したときに正しく動作することを確認する.

○ 試験/解析内容

CanSat に搭載している全てのセンサの値と, モータの速度及びオドメトリの値を 0.5 秒おきにて取得し, SD カードに保存する. その後, SD カードのログデータを確認し, センサの値とモータの速度及びオドメトリの値が正しく保存できていることを確認する.

○ 結果

試験の動画を以下の URL に示す.

URL (1 回目) : <https://youtu.be/auAM2yIh1Wk>

URL (2 回目) : <https://youtu.be/fTnlYGcnDKQ>

また, この試験は (V7), (V8), (V9) の試験も兼ねている. 試験内容と動画の該当箇所を Table 3 に示す.

動画より, CanSat に搭載している全てのセンサとモータを統合したときに正しく動作していることが確認できた.

○ 結論

GPS センサ, 加速度センサ, 無線通信モジュール, モータを統合したときに正しく動作することが確認できた.

Table 3 試験内容と動画の該当箇所 ((V5) ~ (V9))

番号	試験内容	該当箇所
(V6)	センサ統合試験	0:46 ~ 4:22 (1 回目) 0:16 ~ 2:26 (2 回目)
(V7)	SD カード記録試験	3:23 ~ 4:22 (1 回目) 1:55 ~ 2:26 (2 回目)
(V8)	GPS センサ精度試験	0:46 ~ 1:43 (1 回目) 0:16 ~ 0:45 (2 回目)
(V9)	加速度センサ試験	1:44 ~ 2:21 (1 回目) 0:46 ~ 1:15 (2 回目)

(V7) SD カード記録試験

○ 目的

CanSat の制御履歴を提出できるように SD カードにデータが保存できることを確認する。

○ 試験/解析内容

CanSat に搭載されているセンサが取得した値を 0.5 秒おきに SD カードに保存する。その後、センサの値が正しく SD カードに保存されていることを確認する。結果の妥当性は、GPS センサから取得される時刻を用いて、ターミナルに表示される最終時刻と SD カードに記録される最終時刻を比較して検証する。

○ 結果

試験の動画を以下の URL に示す。

URL (1 回目) : <https://youtu.be/auAM2yh1Wk>

(V6) センサ統合試験の動画, 該当箇所 : 3:23 ~ 4:22)

URL (2 回目) : <https://youtu.be/fTnlYGcnDKQ>

(V6) センサ統合試験の動画, 該当箇所 : 1:55 ~ 2:26)

動画より、ターミナルに表示された最終時刻と SD カードに記録された最終時刻が一致している (1 回目は 15:22, 2 回目は 15:26) ことが確認できた。

○ 結論

SD カードにデータが正しく保存できることが確認できた。

(V8) GPS センサ精度試験

- 目的  
GPS センサから取得される値の精度を確認する.
- 試験/解析内容  
GPS センサとスマートフォンから取得される時刻, さらに GPS センサと Google マップから取得される緯度経度の値をそれぞれ比較し, 一致していることを確認する.
- 結果  
試験の動画を以下の URL に示す.  
URL (1 回目) : <https://youtu.be/auAM2yIh1Wk>  
( (V6) センサ統合試験の動画, 該当箇所 : 0:46 ~ 1:43 )  
URL (2 回目) : <https://youtu.be/fTnlYGcnDKQ>  
( (V6) センサ統合試験の動画, 該当箇所 : 0:16 ~ 0:45 )  
各試験においてスマートフォンの表示時刻 (真値) と GPS センサから取得された時刻及び Google マップ上での本試験を行った緯度経度 (真値) と GPS センサから取得された緯度経度の値を Table 4 に示す.  
さらに, 緯度経度に関して真値と GPS センサから取得された値を Google マップ上で示した図を Figure 23 に示す. 誤差半径は 1 回目が 1 m, 2 回目が 10 m であった. ここで, 本チームの過去の大会結果より 10 m 程離れた CanSat は肉眼で確認することが可能であり, 今回の結果は 2 回とも肉眼で確認可能な誤差半径内であることが確認できる. ただし, マイコンのクロック周波数は 1.4 GHz であり, L1 信号の周波数 (1575.42 MHz) の約数でないことを確認した.
- 結論  
GPS センサの取得値の誤差が肉眼で確認可能な 10 m 以内であることが確認できた.

Table 4 GPS センサ精度試験の結果

		真値	GPS センサの取得値
1 回目	時刻	15:21	15:21
	緯度	35.555410	35.555405
	経度	139.654750	139.654767
2 回目	時刻	15:25	15:25
	緯度	35.555410	35.55553
	経度	139.654750	139.654757



Figure 23 GPS センサの誤差



(V10) 無線 ON/OFF 試験

○ 目的

一定時間経過すると無線通信モジュールが ON から OFF の状態となること、さらにその後フライトピンを抜くことによって OFF から ON の状態となることを確認する。

○ 試験/解析内容

本ミッションでは、プログラムを実行すると無線通信が開始され、一定時間経過すると無線通信を停止する。そして CanSat がキャリアから放出されて CanSat の回路基板に取り付けられていたフライトピンが抜けたことを検知すると、無線通信を再開する。

本試験では、プログラムを実行した後無線通信を行い、その通信データが受信できていることを地上局で確認する。そして、CanSat がキャリアから放出されたと仮定してフライトピンを抜いた後、無線通信が再開されて通信データが再度受信できていることを地上局で確認する。

○ 結果

試験の動画を以下の URL に示す。

URL (1 回目) : <https://youtu.be/KGKB14rlbT0>

URL (2 回目) : [https://youtu.be/N\\_18Xt-FNRk](https://youtu.be/N_18Xt-FNRk)

動画より、プログラムを実行して一定時間が経過すると無線通信モジュールが ON から OFF の状態になって無線通信が停止し、フライトピンを抜くと OFF から ON の状態になって無線通信が再開することが確認できた。

○ 結論

無線通信モジュールをソフト的に ON から OFF の状態にすること及び OFF から ON の状態にすることが確認できた。

(V11) 準静的荷重試験

○ 目的

打ち上げ時の準静的荷重に耐えられることを確認する。

○ 試験/解析内容

CanSat をロープにつなぎ、ハンマー投げのように人を中心とした等速円運動を行うことで打ち上げ時の準静的荷重を再現する。ここで、打ち上げ時の準静的荷重は 10 G である一方、等速円運動の際に発生する遠心力は  $(mv^2)/r$  と表せる。ただし、 $m$  は CanSat の質量を示しており、本試験では回転半径  $r$ 、回転速度  $v$  を調整することで CanSat に 10 G を加える。そして準静的荷重を加えた後に CanSat が破損しないこと及び GPS センサが値を取得でき、地上局へデータを送信できることを確認する。ここで、準静的荷重の値を取得する際に用いたセンサは ATR 社の AMWS020 である。Figure 24 に示すように CanSat の下面に固定し、回転円の遠心力方向と加速度センサの X 軸方向を一致させて X 軸方向の加速度を準静的荷重として計測する。

○ 結果

試験の動画を以下の URL に示す。また、実際に CanSat に加えた準静的荷重を Figure 25 に示す。

URL (1 回目) : [https://youtu.be/blhWTltpC\\_4](https://youtu.be/blhWTltpC_4)

URL (2 回目) : <https://youtu.be/24rnuX2d-JA>

動画より、CanSat に 10 秒間 10 G を加え続けた後も GPS センサが取得した時刻と PC が表示している時刻が Table 6 に示すように一致しており、地上局へのデータの送信も行っていることが確認できた。さらに、CanSat の破損も確認されなかった。

○ 結論

CanSat が打ち上げ時の準静的荷重に耐えられることが確認できた。

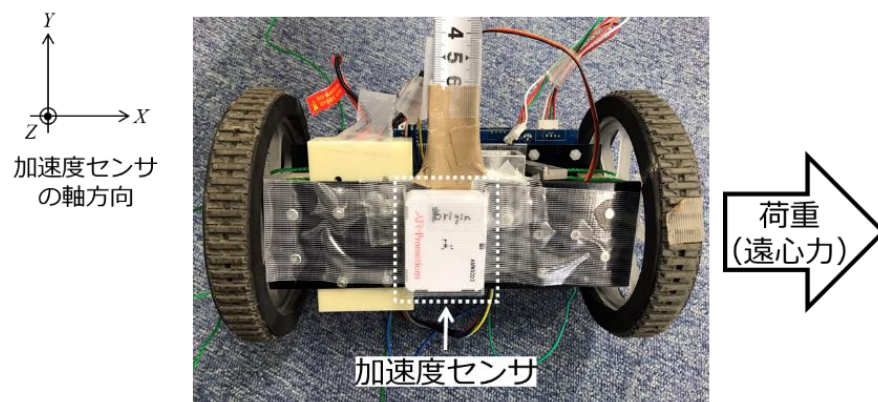
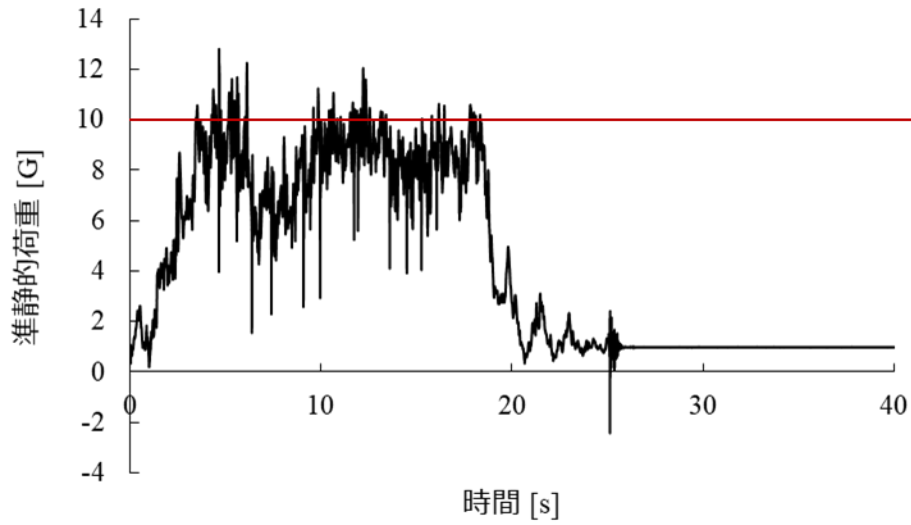
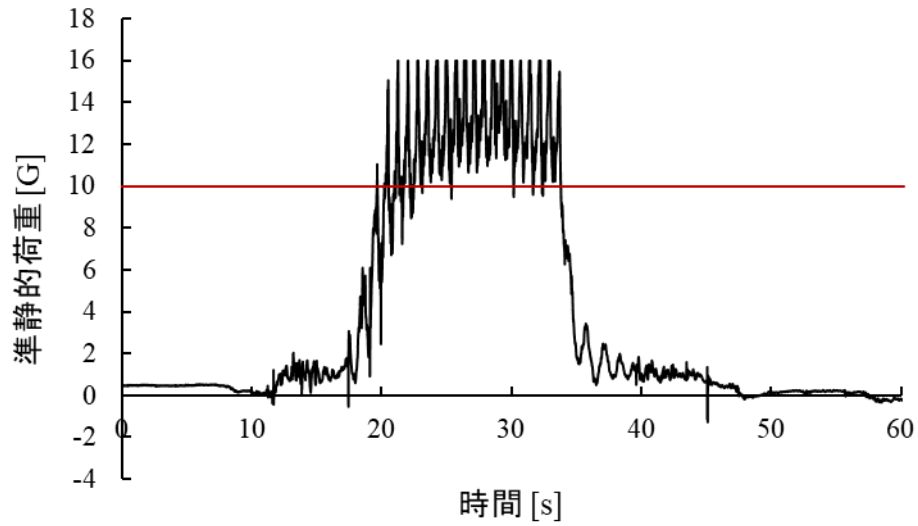


Figure 24 準静的荷重試験に用いた CanSat



(a) 1回目



(b) 2回目

Figure 25 CanSatへ加えた準静的荷重

Table 5 準静的荷重試験の結果 (時刻)

	真値 (PC 画面)	GPS センサ	動画の該当箇所
1 回目	10:49	10:49	2:34
2 回目	10:55	10:55	1:56

## (V12) 振動試験

### ○ 目的

打ち上げ時の振動の荷重に耐えられることを確認する。

### ○ 試験/解析内容

Figure 26 に示す 3 か所で CanSat を直接加振機にねじ止めして固定し、振動試験を行う。本試験では、レギュレーションに記載されている推奨試験条件を踏まえ、1 ~ 2300 Hz、最大 15 G の正弦波振動を加振機から CanSat へ加える。ここで、荷重の値を取得する際に用いたセンサは ATR 社の AMWS020 であり、Figure 27 に示すように加振機と CanSat の 2 か所に取り付ける。加振機側は、加振機の側面に固定して振動の方向と加速度センサの Y 軸方向を一致させる。一方 CanSat 側は、CanSat の回路上に固定して振動の方向と加速度センサの Y 軸方向を一致させる。そして Y 軸方向の加速度を振動の荷重として計測する。

### ○ 結果

試験の動画を以下の URL に示す。

URL : [https://youtu.be/Z\\_j0kptz\\_jo](https://youtu.be/Z_j0kptz_jo)

また、実際に加振機の Y 軸方向の加速度と CanSat に加えた振動荷重をそれぞれ Figure 28, Figure 29 に示す。さらに片道の掃引速度  $s$  は次式に基づいて算出した。

$$s[\text{oct/min}] = \frac{\log_2(2300\text{Hz}/1\text{Hz})}{4\text{min}} \approx 2.8\text{oct/min}$$

動画より、加振機の振動によって CanSat へ 1 ~ 2300 Hz、最大 15 G の正弦波振動を加えた後も、CanSat は正常に動作し、破損がないことも確認できた。

### ○ 結論

CanSat が打ち上げ時の振動の荷重に耐えられることが確認できた。

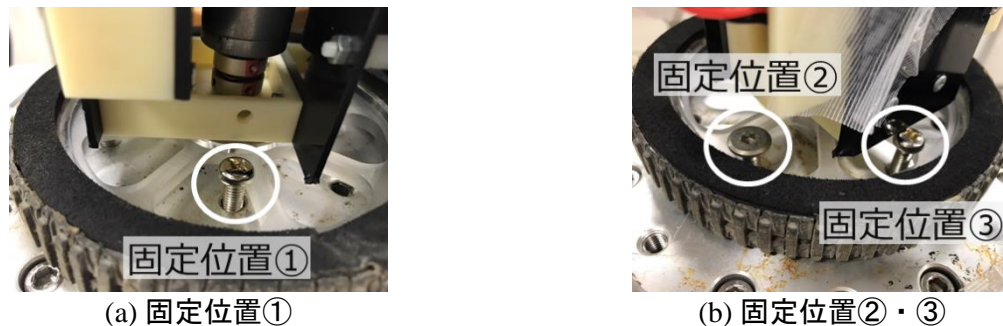


Figure 26 加振機への固定 (3 か所)

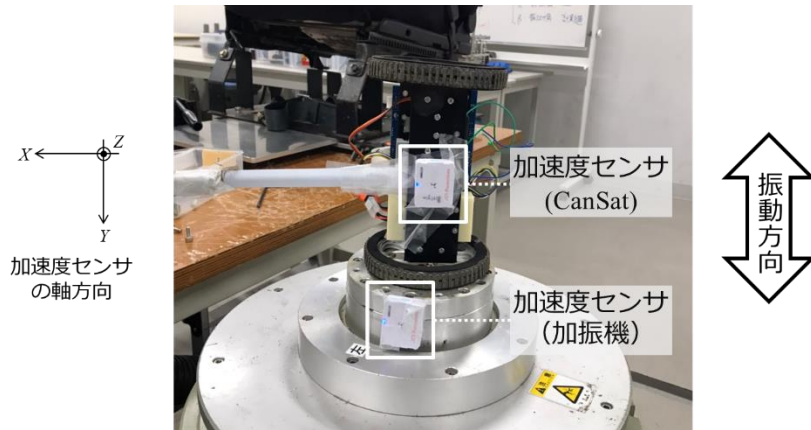


Figure 27 加振機と CanSat へのセンサの取り付け

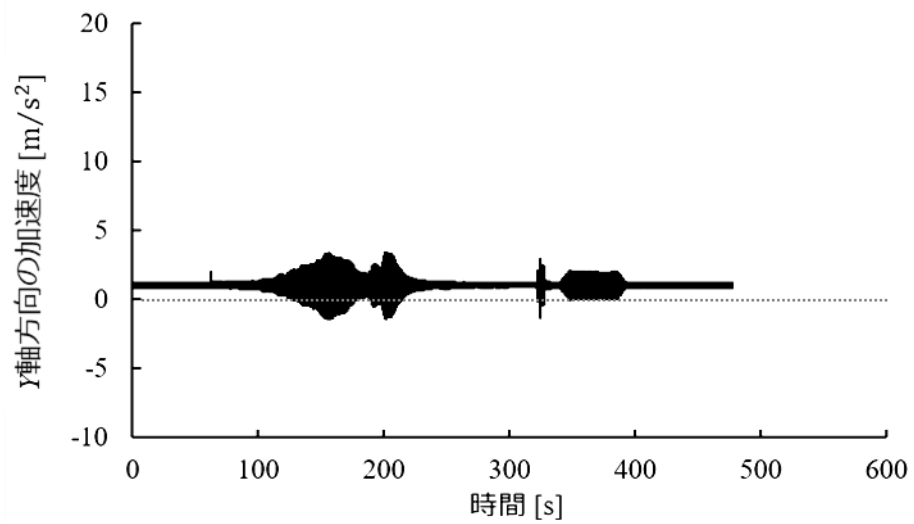


Figure 28 加振機にかかる加速度 (Y 軸方向)

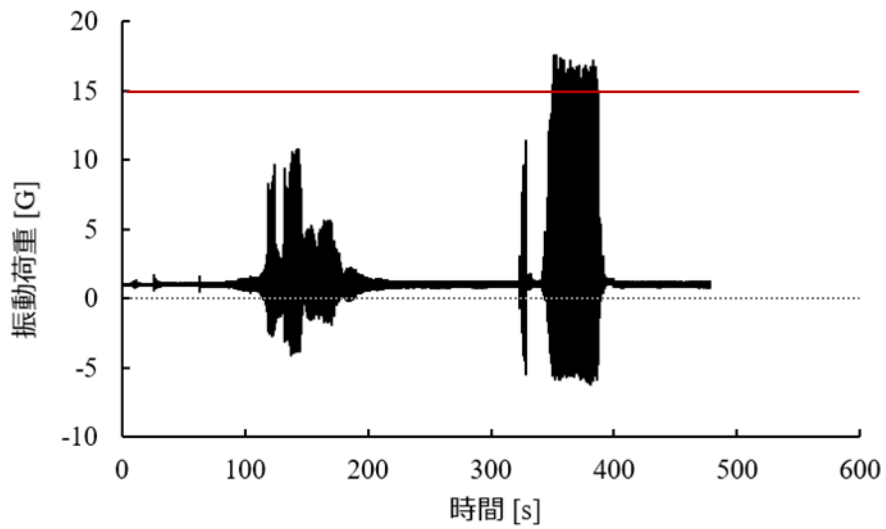


Figure 29 CanSat にかかる振動荷重 (Y 軸方向)

(V13) 分離衝撃試験

(V15) 開傘衝撃試験

○ 目的

(V13) キャリアから放出される際の衝撃に耐えられることを確認する.

(V15) パラシュートが開傘する際の衝撃に耐えられることを確認する.

○ 試験/解析内容

キャリアから放出される際の瞬間的な大気への開放による空気抵抗及びパラシュートが開傘する際の撃力は約 20 G である. これは本チームの過去の大会結果, 及び他チームの大会結果を参考とする. パラシュートが開傘する際のも同様である. そこで本試験では, CanSat とパラシュートの接続部を紐で接続し, 高所から自由落下させて紐が張り合ったとき, 紐の方向へ 20 G がかかるようにする.

ここで, 紐の長さの算出方法について述べる. 質量  $m=1$  kg の CanSat を高さ (紐の長さ)  $h$  から落下させたとき, エネルギー保存則より次式が成り立つ. ただし,  $v$  は落下点での CanSat の速度,  $g$  は重力加速度を示す.

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2$$

また運動量保存則より, 落下点で CanSat が  $\Delta t$  の間, 撃力  $F$  を受けるとき次式が成り立つ.

$$F\Delta t = mv$$

以上より, 紐の長さ  $h$  は次式より求まる. ただし  $F=20$  G,  $\Delta t=0.05$  s とする.

$$h = \frac{(F\Delta t)^2}{2g} = \frac{(20 \times 0.05)^2}{2 \times 9.8} \approx 5 \text{ m}$$

そこで本試験では, CanSat に 5 m の紐を接続して CanSat を自由落下させ, 紐が張り合う時の撃力に CanSat 及びパラシュートとの接続部が耐えられることを確認する. 具体的には, 撃力を加えた時にパラシュートとの接合部が破損しないこと及び撃力を加えた後も GPS センサが正しく値を取得でき, かつフライトピンを用いたステート移行が行えることを確認する. ここで, 撃力の値を取得する際に用いたセンサは ATR 社の AMWS020 であり, Figure 30 に示すように CanSat の下面に固定し, XYZ 軸の合成加速度を落下時にかかった撃力として計測する.

○ 結果

試験の動画を以下の URL に示す. また, 実際に CanSat に加えた撃力を Figure 31 に示す.

URL (1 回目) : <https://youtu.be/T7NUJOGivUs>

URL (2 回目) : <https://youtu.be/ZA35PXJI0g4>

動画より, 撃力を加えてもパラシュートと CanSat は接続された状態であり, 破損は見られなかった. さらに, GPS センサが取得した時刻と PC が表示している時刻が Table 6 に示すように一致しており, かつフライトピンが抜けたことを検知してステート移行を行い, 地上局との通信が再開できていることが確認できた.

○ 結論

CanSat がキャリアから放出される際の衝撃及びパラシュートが開傘する際の衝撃に耐えられることが確認できた。

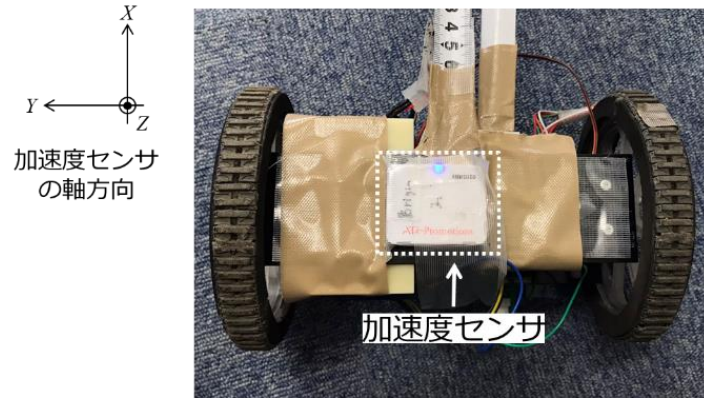
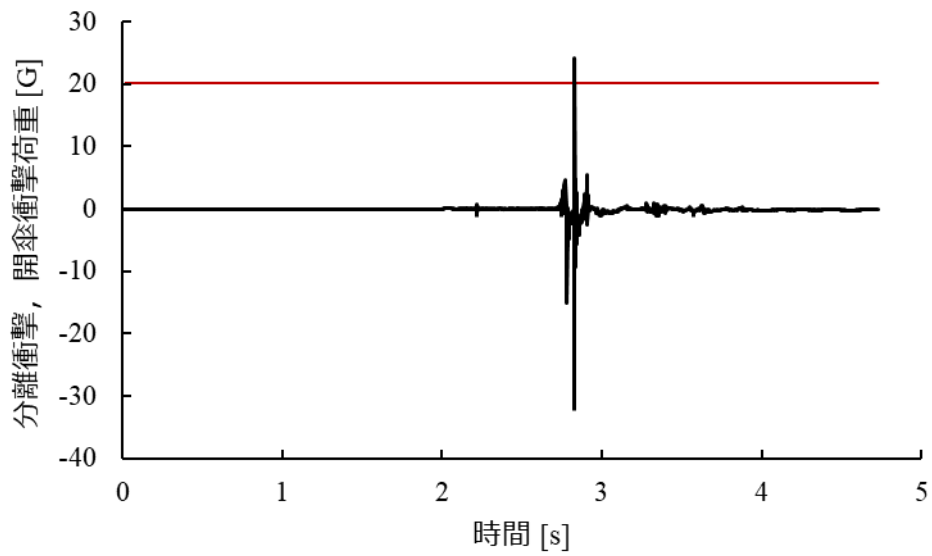
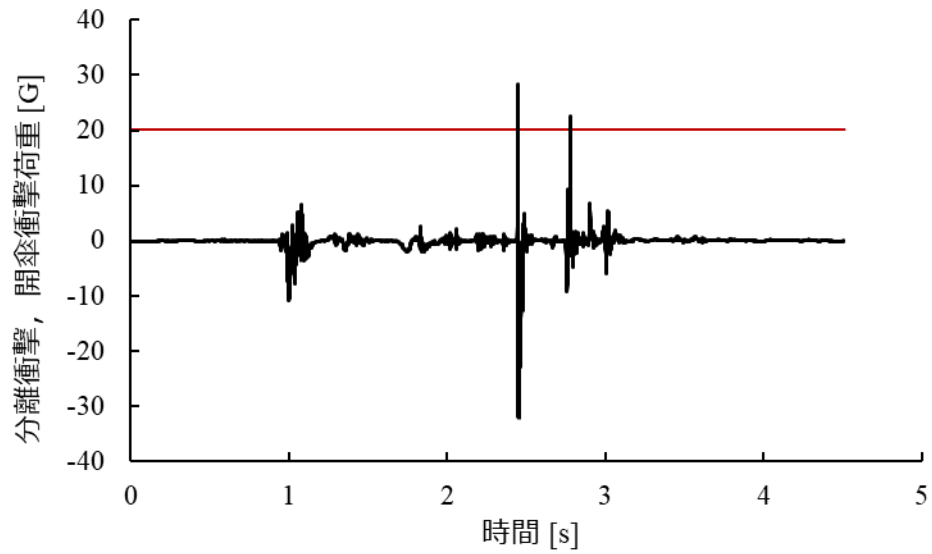


Figure 30 分離, 開傘衝撃試験に用いた CanSat



(a) 1回目



(b) 2回目

Figure 31 CanSat へ加えた撃力

Table 6 分離, 開傘衝撃試験の結果 (時刻)

	真値 (PC 画面)	GPS センサ	動画の該当箇所
1 回目	12:56	12:56	3:23
2 回目	13:27	13:27	2:24



(V14) 無線 CH 変更試験

- 目的  
通信の妨害や混線を防ぐため、無線通信モジュールのチャンネルが変更できることを確認する。
- 試験/解析内容  
本ミッションで CanSat に搭載する無線通信モジュールとして LoRa を使用している。そこで、LoRa のチャンネルが変更可能であることを確認する。  
本試験では、TeraTerm 上で LoRa のチャンネルを変更し、同じチャンネル同士の LoRa はつながり、違うチャンネル同士の LoRa はつながらないことを確認する。
- 結果  
試験の動画を以下の URL に示す。  
URL (1 回目) : <https://youtu.be/ai8cXRqT12M>  
URL (2 回目) : <https://youtu.be/3hXljyilttQ>  
動画より、LoRa のチャンネルが変更可能であることが確認できた。さらに、同じチャンネル同士の LoRa は通信できるが、違うチャンネル同士の LoRa は通信できないことが確認できた。
- 結論  
通信の妨害や混線を防ぐため、無線通信モジュールのチャンネルを変更できることが確認できた。

(V16) パラシュート落下試験

○ 目的

パラシュートが開傘して減速することを確認する。

○ 試験/解析内容

パラシュートを付けた CanSat をキャリアに収納し、Figure 32 (a) に示す試験場において約 19 m の高さからキャリアを下向きにして落下させる。ただし、落下させる CanSat は故障防止のため、Figure 32 (b) に示すようにガムテープで補強している。そしてパラシュートが開傘してから着地するまでの高さ  $h$  と時間  $t$  を計測し、落下速度  $v = h/t$  を算出する。ただし、落下途中で CanSat が壁に衝突した場合は、パラシュートが開傘してから壁に衝突するまでの高さを  $h$ 、時間を  $t$  とする。

パラシュートは終端落下速度が 6 m/s 以下となるよう設計している。そこで試行を 5 回繰り返して平均速度  $\bar{v}$  を算出し、 $\bar{v}$  が 6 m/s 以下であることを確認する。

○ 結果

試験の結果を Table 7 に示す。ただし、試験の動画の URL をハイパーリンクとして挿入している。また、平均落下速度は 4.2 m/s であり、6 m/s 以下であることが確認できた。

○ 結論

パラシュートが開傘して減速できることが確認できた。



(a) 試験場



(b) 落下させる CanSat

Figure 32 パラシュート落下試験

Table 7 パラシュート落下試験の結果

URL	結果	高さ $h$ [m]	時間 $t$ [s]	落下速度 $v$ [m/s]
<a href="#">1回目</a>	開傘成功	12	2.6	4.6
<a href="#">2回目</a>	開傘成功	12	2.8	4.3
<a href="#">3回目</a>	開傘成功	12	2.9	4.2
<a href="#">4回目</a>	開傘成功	13	3.1	4.2
<a href="#">5回目</a>	開傘成功 (壁に衝突)	4.5	1.2	3.8
平均値				$\bar{v} = 4.2$

(V17) 落下衝撃試験

○ 目的

パラシュートの落下衝撃で CanSat が故障しないことを確認する。

○ 試験/解析内容

パラシュートの終端速度と同等の落下速度となるように CanSat を自由落下させた後、CanSat が正常に動作するかを確認する。試験 (V16) から、パラシュートの終端落下速度の平均値  $\bar{v}$  を算出する。そして落下速度  $v$  が  $\bar{v}$  となるように落下させる。本試験では、以下の式から落下高さ  $h$  を算出し、CanSat を  $h$  から落下させる。

$$\frac{1}{2}m\bar{v}^2 - 0 = 2mgh$$
$$\Leftrightarrow h = \frac{\bar{v}^2}{2g} = \frac{(4.2 \text{ m/s})^2}{2 \times 9.8 \text{ m/s}^2} \approx 0.9 \text{ m}$$

○ 結果

試験の結果として、落下後のセンサと動力系の状態及び外観の破損状態を Table 7 に示す。ただし、試験の動画の URL をハイパーリンクとして挿入している。

動画より、CanSat を 0.9 m から落下させてもセンサと動力系の異常は確認されず、外観の破損も確認されなかった。

○ 結論

パラシュートの落下衝撃で CanSat が故障しないことが確認できた。

Table 8 パラシュート落下試験の結果

URL	センサ	動力系	外観
<a href="#">1回目</a>	正常な値を取得	正常に動作	破損なし
<a href="#">2回目</a>	正常な値を取得	正常に動作	破損なし
<a href="#">3回目</a>	正常な値を取得	正常に動作	破損なし
<a href="#">4回目</a>	正常な値を取得	正常に動作	破損なし
<a href="#">5回目</a>	正常な値を取得	正常に動作	破損なし

## 2. ミッション要求を満たすための試験内容

### (V3) 電池試験

- 目的
  - MISSION 遂行に十分な電源を有することを確認する.
- 試験/解析内容
  - ACTS のレギュレーションに記載されている 15 分の競技時間に加えて投下前の準備に 20 分費やすと仮定すると, 計 35 分以上の電源供給が要求される. そこで, さらに負荷をかけることを想定し, CanSat が約 1 時間動作することを確認する.
- 結果
  - 試験の動画を以下の URL に示す.  
URL : <https://youtu.be/Z0ceLWLvQsg>
- 結論
  - CanSat は約 1 時間動作しており, MISSION 遂行に十分な電源を有することが確認できた.

(V9) 加速度センサ試験

○ 目的

加速度センサを揺らした際に取得された値が変動していることを確認し、第4章2節C)で示したように加速度センサが CanSat の着地判定に利用できることを確認する。

○ 試験/解析内容

CanSat を揺らし、加速度センサから取得された値が変動していることを確認する。

○ 結果

試験の動画を以下の URL に示す。

URL (1 回目) : <https://youtu.be/auAM2yIh1Wk>

( (V6) センサ統合試験の動画, 該当箇所 : 1:44 ~ 2:21)

URL (2 回目) : <https://youtu.be/fTnlYGcnDKQ>

( (V6) センサ統合試験の動画, 該当箇所 : 0:46 ~ 1:15)

加速度センサによって得られる値の単位は  $m/s^2$  である。また、本試験では、重力加速度を除いた、物体のみの加速度の値を加速度センサから得ている。このような重量加速度を除く処理は、今回利用した加速度センサの Bno555 内で行われている。

動画より、加速度センサを揺らすと取得された値が最初の値から変動していることが確認できた。

○ 結論

加速度センサが揺れると取得値が変動することから、CanSat の着地判定に加速度センサを利用できることが確認できた。



(V18) 姿勢変更・保持試験

○ 目的

着地したときの CanSat の姿勢に関係なく、回路基板が機体上部にくるよう、CanSat が姿勢を変更できることを確認する。

○ 試験/解析内容

CanSat を反転及び横転させる。その状態から回路基板が機体上部にくるよう、CanSat が姿勢を変更できることを確認する。

○ 結果

試験の動画を以下の URL に示す。

URL (1 回目) : <https://youtu.be/Xg-ZUGq4FLw>

URL (2 回目) : <https://youtu.be/5us-30Cvry8>

動画より、CanSat が反転及び横転した状態から姿勢を変更できることが確認できた。

○ 結論

着地したときの CanSat の姿勢に関係なく、回路基板が機体上部にくるよう、CanSat が姿勢を変更できることが確認できた。

(V19) 走破性能試験

○ 目的

CanSat が永久影外周を走行するために必要な走破性能を有するか確認する.

○ 試験/解析内容

CanSat を様々な傾斜角度の砂地で走行させる. CanSat が走行不可能となるまで傾斜角度を大きくし, 走行可能な最大傾斜角度を確認する. ただし, 傾斜角度は CanSat が走行した距離 (斜辺の長さ) と高さに基づいて算出する.

また, CanSat を草地で走行させ, タイヤが草でスリップしないこと及び長い草に引っかからないことを確認する.

○ 結果

試験の動画を以下の URL に示す.

URL (砂地 1 回目) : <https://youtu.be/-SRTNrcEg4Y>

URL (砂地 2 回目) : <https://youtu.be/y6OUx9oUc18>

URL (草地 1 回目) : <https://youtu.be/lrWFdB8md9g>

URL (草地 2 回目) : <https://youtu.be/TY5fY5Mn2pE>

また, 砂地の試験において CanSat が走行した距離 (斜辺の長さ) と高さから算出した傾斜角度を Table 9 に示す. 2 回の試験より CanSat が走行可能な最大傾斜角度は  $37.5^\circ$  であった.

○ 結論

CanSat が  $37.5^\circ$  の傾斜角度まで走行可能であること及び草地でも走行可能であることから, 永久影外周を走行するために必要な走破性能を有することが確認できた.

Table 9 走破性能試験の結果 (砂地)

	結果	斜辺 [m]	高さ [m]	傾斜角度 [deg]
1 回目	成功	0.26	0.10	22.6
	成功	0.24	0.11	27.3
	成功	0.25	0.13	31.3
	成功	0.23	0.14	37.5
	失敗	0.23	0.15	40.7
2 回目	成功	0.23	0.14	37.5
	失敗	0.22	0.14	39.5

(V20) 走行試験

○ 目的

CanSat が事前に与えられた GPS 情報をもとに通信開始地点付近まで自律で走行できることを確認する。

○ 試験/解析内容

準備として、事前に通信開始地点の GPS 情報を CanSat に与える。そしてプログラムを実行して走行ステートまで移行したとき、GPS センサを用いて事前に与えられた通信開始地点付近まで自律で走行できることを確認する。

○ 結果

試験の動画を以下の URL に示す。

URL (1 回目) : <https://youtu.be/fCnMtlgaRVU>

URL (2 回目) : <https://youtu.be/PMLAfQoU708>

また、この試験は (V23) の試験も兼ねている。試験内容と動画の該当箇所を Table 10 に示す。

動画より、プログラムが開始されると CanSat は GPS 情報を取得し、着地判定が行われた後取得した GPS 情報をもとに通信開始地点付近まで自律で走行できることが確認できた。

○ 結論

CanSat が事前に与えられた GPS 情報をもとに通信開始地点付近まで自律で走行できることが確認できた。

Table 10 試験内容と動画の該当箇所 ( (V20) . (V23) )

番号	試験内容	該当箇所
(V20)	走行試験	0:48 ~ 3:23 (1 回目) 0:00 ~ 2:35 (2 回目)
(V23)	相対測位試験	3:24 ~ 10:08 (1 回目) 2:36 ~ 9:30 (2 回目)

(V21) 通信試験

○ 目的

CanSat と探査ローバが双方向に通信を行い、RSSI 値が取得できることを確認する.

○ 試験/解析内容

CanSat と探査ローバ間で双方向に通信を行い、探査ローバがデータを送信したときと受信したときに RSSI 値が取得できることを確認する.

○ 結果

試験の動画を以下の URL に示す.

URL (1 回目) : <https://youtu.be/6VJ8hxdMLXg>

URL (2 回目) : <https://youtu.be/vu7JR-EsKMA>

動画より、データを送信したときと受信したときに RSSI 値が取得できることが確認できた.

○ 結論

CanSat と探査ローバが双方向に通信を行い、RSSI 値が取得できることが確認できた.

(V22) 自己位置推定試験

- 目的  
エンコーダから移動距離を推定できることを確認する。
- 試験/解析内容  
オドメトリより CanSat の並進距離が算出できることを確認する。さらに、メジャーで実際に CanSat が移動した距離を測定し、精度を確認する。
- 結果  
試験の動画を以下の URL に示す。  
URL (1 回目) : <https://youtu.be/yuJVOIMbdKs>  
URL (2 回目) : <https://youtu.be/T3e51KFNB94>  
また、オドメトリから算出された距離と実際に CanSat が走行した距離、さらに精度を Table 11 に示す。ただし精度は、並進距離の誤差の絶対値を CanSat が実際に走行した距離で除算し、100 をかけて求める。  
動画より、精度良く並進距離を算出できることが確認できた。
- 結論  
エンコーダから移動距離を推定できることが確認できた。

Table 11 並進距離と精度

	オドメトリの算出距離	CanSat の走行距離	誤差
1 回目	2.98 m	3.03 m	1.65 %
2 回目	2.73 m	2.65 m	3.02 %

(V23) 相対測位試験

○ 目的

CanSat 座標系において探査ローバの相対測位が行えることを確認する。

○ 試験/解析内容

探査ローバとの通信で取得された RSSI 値から推定された探査ローバまでの距離と自己位置推定の情報をもとに CanSat 座標系における探査ローバの推定座標を算出できることを確認する。

○ 結果

試験の動画を以下の URL に示す。

URL (1 回目) : <https://youtu.be/fCnMtlgaRVU>

( (V20) 走行試験の動画, 該当箇所 : 3:24 ~ 10:08)

URL (2 回目) : <https://youtu.be/PMLAfQoU708>

( (V20) 走行試験の動画, 該当箇所 : 2:36 ~ 9:30)

また, 実際の計測値 (真値) と推定値から算出される誤差距離  $L_{Error}$  を Table 12 に, 描画された 3 次元の図を Figure 33 に示す。ただし, 動画内で示されている誤差距離は計算が誤っており, Table 12 に示されている値が正しい。

1 回目の試験では, 誤差距離が 5 m より大きく, 永久影内に侵入して走行していた。誤差距離が大きくなった原因は RSSI 値, 永久影内への侵入は GPS センサの誤差によるものであり, 今後検討する必要がある。2 回目の試験では, 永久影外周を走行して測位を行い, 誤差距離が 5 m 以内であったためフルサクセスを満たす精度が確認できた。

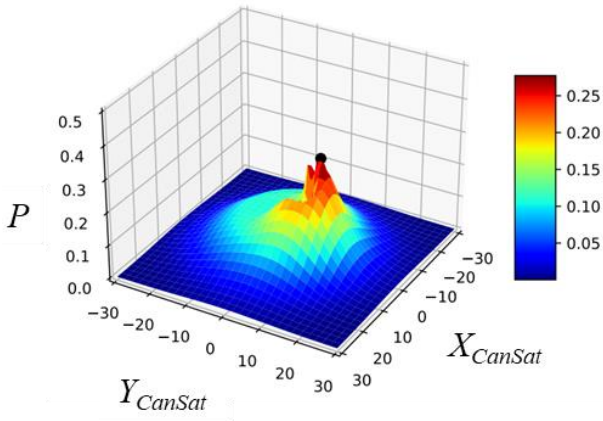
○ 結論

CanSat 座標系において探査ローバの相対測位が行えることが確認できた。ただし, 精度が十分でない部分があるため, 今後検討する必要がある。

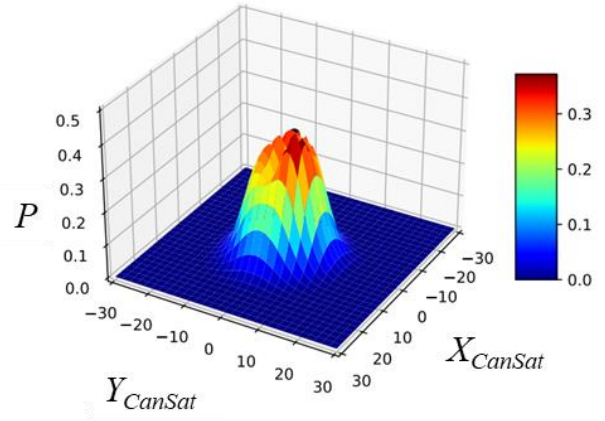
Table 12 相対測位試験の結果 (誤差距離  $L_{Error}$ )

		距離 $L$ [m]	角度 $q$ [deg]	誤差距離 $L_{Error}$ [m]
1 回目	計測値 (真値)	11.6	200	6.5
	推定値	14.8	225	
2 回目	計測値 (真値)	10.5	328	3.3
	推定値	9.7	310	





(a) 1回目



(b) 2回目

Figure 33 相対測位試験の結果 (探査ローバの推定位置)

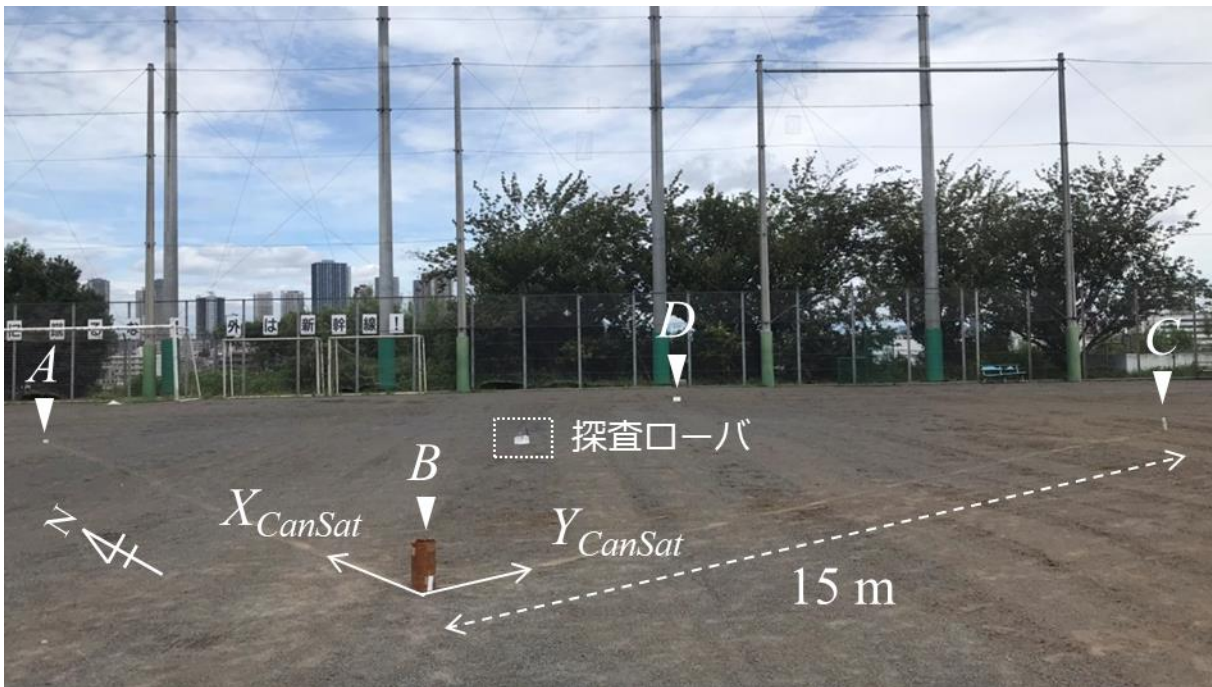
(V24) End to End 試験

○ 目的

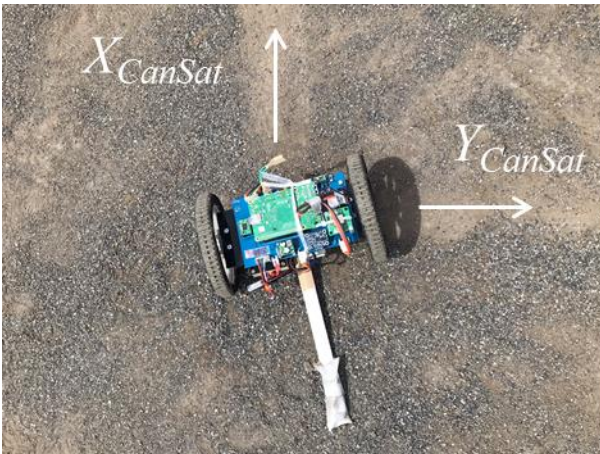
CanSat が全てのミッションシーケンスを自律的に遂行できることを確認する.

○ 試験/解析内容

試験環境を Figure 34 に示す. Figure 1 に示したミッションシーケンスに従い, CanSat が準備状態から測位状態までを自律的に行えることを確認する.



(a) 試験場



(b) CanSat (地点 B)



(c) 探査ローバ

Figure 34 試験環境

○ 結果

各ステートの試験内容及び結果を Table 13 に示す。ただし、試験の動画の URL をハイパーリンクとして挿入している。また、実際の計測値（真値）と推定値から算出される誤差距離  $L_{Error}$  を

Table 14 に、描画された 3 次元の図を Figure 35 に示す。ただし、動画内で示されている誤差距離は計算が誤っており、

Table 14 に示されている値が正しい。ここで、誤差距離が大きくなった原因について考察する。エンコーダを用いた自己位置推定は、実際の走行距離との比較により、精度は十分だった。よって、今回誤差距離が大きくなった原因は RSSI 値に基づいた距離推定だと考えており、距離推定式の見直しなど、精度の向上に向けて検討を重ねる必要がある。また、CanSat が永久影内に侵入する場面があったが、これは GPS センサの精度の問題だと考えており、同様に今後検討を重ねていく。

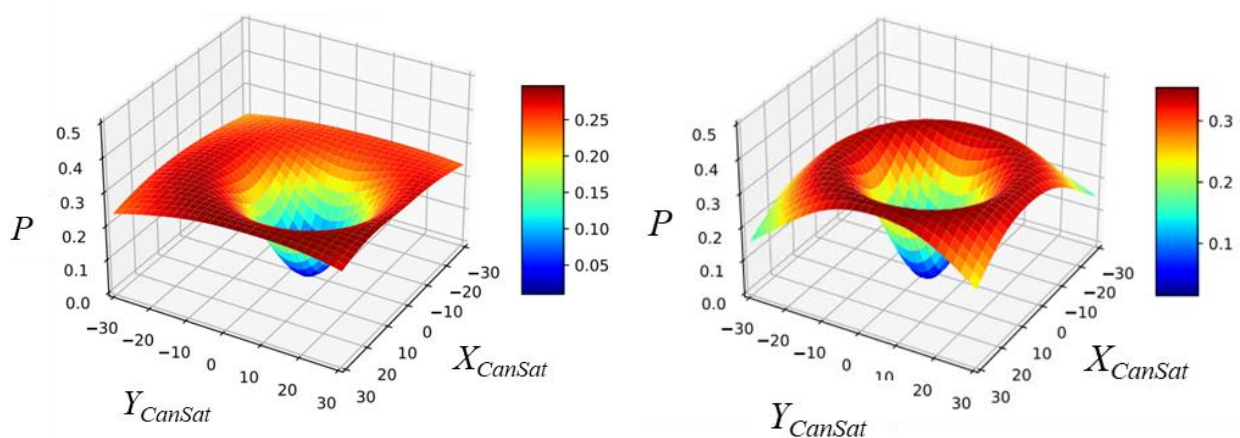
Table 13 End to End 試験の結果（ミッションシーケンス）

	ステート	試験内容	結果	該当箇所
1 回目	準備	地上局との通信開始	成功	0:16 ~ 2:30
		GPS 情報の取得	成功	
		収納検知により通信停止	成功	
		キャリアへ搭載	成功	
	放出 降下 着地	放出検知により通信再開	成功	2:40 ~ 4:00
		着地検知により パラシュートの分離	成功	
	移動	通信開始地点へ走行	成功	4:01 ~ 4:57
	通信	探査ローバとの通信開始	成功	4:58 ~ 10:14 (失敗 : 7:17 ~ 9:33)
		永久影外周の走行	失敗	
		RSSI 値の取得	成功	
距離推定		成功		
測位	相対測位	成功	10:15 ~ 10:27	
解析	真値の計測 SD カードの記録の確認	成功	10:28 ~ 13:44	
2 回目	準備	地上局との通信開始	成功	0:44 ~ 3:08
		GPS 情報の取得	成功	
		収納検知により通信停止	成功	
		キャリアへ搭載	成功	
	放出 降下 着地	放出検知により通信再開	成功	3:39 ~ 4:38
		着地検知により パラシュートの分離	成功	
	移動	通信開始地点へ走行	成功	4:39 ~ 5:39
	通信	探査ローバとの通信開始	成功	5:40 ~ 10:41 (失敗 : 7:38 ~ 9:13)
永久影外周の走行		失敗		
RSSI 値の取得		成功		

		距離推定	成功	
	測位	相対測位	成功	10:42 ~ 10:49
	解析	真値の計測 SDカードの記録の確認	成功	10:50 ~ 13:13

Table 14 End to End 試験の結果 (誤差距離  $L_{Error}$ )

		距離 $L$ [m]	角度 $q$ [deg]	誤差距離 $L_{Error}$ [m]
1 回目	計測値 (真値)	11.9	203	23.9
	推定値	12.4	345	
2 回目	計測値 (真値)	12.4	115	18.8
	推定値	18.2	42	



(a) 1 回目 (b) 2 回目  
Figure 35 End to End 試験の結果 (探査ローバの推定位置)

368996.6,15:34:58,35.55491833,139.65617500, 0.021, 0.003,-0.003,70.981, 70.0,5917,-0.1727,-9.404,14.754,92.688  
経過 状態 GPSセンサ 加速度センサ モータ エンコーダ 位置, 角度  
時間

Figure 36 制御履歴の見方

- 結論  
CanSat が全てのミッションシーケンスを自律的に遂行できることが確認できた。ただし、永久影内への侵入や推定精度が不十分であったため、今後検討して改善する。
- 制御履歴  
SDカードへ記録する制御履歴を Figure 36 に示す。左から、ミッション開始からの経過時間 [ms]、状態番号、GPS センサの取得値 (時刻、緯度、経度)、加速度センサの取得値 (3 軸)、マイコンから左右のモータへの速度指令値 (最大値 100)、エンコーダの取得値 (速度、角速度)、CanSat 座標系における位置と角度 ( $x_{CanSat}, y_{CanSat}, q$ )、となっている。ここで、End to End 試験 (1 回目) で得られた制御履

歴 (Figure 37) に従い, ミッションシーケンスとステート移行及びセンサ値の記録について確認する.



<b>0: 準備ステート</b>												
2431	0	15:31:42.35.55499667	139.65606833	-0.003	0.006	0.001	0	0	0	0	0	0.0
3491	0	15:31:43.35.55499667	139.65606833	0.0	0.002	0.001	0	0	0	0	0.359.938	
4549	0	15:31:44.35.55499667	139.65606833	-0.001	-0.001	0.002	0	0	0	0	0.359.938	
～中略 (時間経過でステート移行)～												
時間経過で 1: 収納ステート												
62464	0	15:32:42.35.55499667	139.65606833	0.0	0.0	-0.001	0	0	0	0	0.359.938	
62520	1	15:32:42.35.55499667	139.65606833	-0.001	0.0	-0.001	0	0	0	0	0.359.938	
62578	1	15:32:42.35.55499667	139.65606833	0.001	0.001	-0.001	0	0	0	0	0.359.938	
～中略 (フライトピンが外れて放出検知)～												
フライトピンが外れたことを検知して 2: 放出ステート												
213731	1	15:34:58.35.55491833	139.65617500	0.002	0.0	0.001	0	0	0	0	0.350.375	
213787	2	15:34:58.35.55491833	139.65617500	-0.001	0.002	0.001	0	0	0	0	0.350.375	
213842	2	15:34:58.35.55491833	139.65617500	0.002	0.002	0.002	0	0	0	0	0.350.375	
～中略 (加速度センサを用いて着地検知)～												
加速度センサが一定時間閾値以下で 3: 着地ステート												
216579	2	15:34:58.35.55491833	139.65617500	-0.001	-0.001	0.0	0	0	0	0	0.350.312	
216634	3	15:34:58.35.55491833	139.65617500	0.0	0.001	0.001	0	0	0	0	0.350.312	
216944	3	15:34:58.35.55491833	139.65617500	0.053	0.003	0.003	0	0	0	0	0.350.375	
サーボモータ 回転 ←												
～中略 (パラシュートの分離)～												
モータを動かして脱出												
221663	3	15:34:58.35.55491833	139.65617500	0.001	-0.001	0.002	0	0	0	0	0.350.375	
221718	3	15:34:58.35.55491833	139.65617500	0.0	-0.001	0.002	100	100	0	0	0.350.375	
221775	3	15:34:58.35.55491833	139.65617500	0.486	0.011	0.031	100	100	0	0	0.350.312	
225694	3	15:34:58.35.55491833	139.65617500	1.271	1.094	0.797	100	100	0	0	0.340.875	
225748	4	15:34:58.35.55491833	139.65617500	-1.497	-0.392	0.569	0	0	0	0	0.339.625	
4: 通信開始ステート												
～中略 (通信開始地点へ移動)～												
通信開始地点へ姿勢変更・走行した後 5: 通信ステート												
280988	4	15:34:58.35.55491833	139.65617500	0.487	0.144	-2.522	-25	25	0	0	-4.346, 4.836.96.812	
281022	4	15:34:58.35.55491833	139.65617500	0.151	0.101	-2.358	-25	25	0	0	-4.346, 4.836.101.75	
281223	4	15:34:58.35.55491833	139.65617500	-0.687	0.618	-2.511	69.796.70.204	0.6015	-0.0173	-4.36	4.901.128.062	
281350	4	15:34:58.35.55491833	139.65617500	2.033	0.052	-0.122	72.422.67.578	0.6534	0.0176	-4.411	4.966.132.812	
281478	4	15:34:58.35.55491833	139.65617500	-0.377	0.503	0.494	72.972.67.028	0.6812	0.0352	-4.47	5.031.133.312	
281607	4	15:34:58.35.55491833	139.65617500	-0.912	0.853	0.179	73.12	66.88	0.7228	0.0584	-4.534, 5.098.129.688	
～中略 (探査ローバと通信)～												
停止して探査ローバと通信した後 6: 走行ステート												
290516	5	15:34:58.35.55491833	139.65617500	0.002	0.0	0.001	0	0	0.7228	0.0584	-8.692, 9.672.129.312	
292195	5	15:34:58.35.55491833	139.65617500	-0.001	0.002	0.004	0	0	0.7228	0.0584	-8.692, 9.672.129.312	
293875	5	15:34:58.35.55491833	139.65617500	-0.003	0.004	0.001	0	0	0.7228	0.0584	-8.692, 9.672.129.312	
～中略 (次の測位場所まで5m走行)～												
目標角度との偏差に応じて 左右のモータへの速度指令値を变化												
327563	6	15:34:58.35.55491833	139.65617500	-0.001	0.012	0.017	82.671	70	0.6033	-0.0224	-8.75, 9.742.129.25	
327685	6	15:34:58.35.55491833	139.65617500	-2.448	0.139	-0.28	82.654	70	0.7548	0.1458	-8.808, 9.813.128.875	
327813	6	15:34:58.35.55491833	139.65617500	2.397	-0.328	0.206	82.552	70	0.7366	0.1142	-8.867, 9.887.126.188	
～中略 (通信と走行を上限回数まで繰り返したら終了)～												
7: 終了ステート												
594455	7	15:34:58.35.55491833	139.65617500	-0.001	0.003	0.0	0	0	0.7569	-0.0129	15.04.17.307.12.312.0.1	
596096	7	15:34:58.35.55491833	139.65617500	-0.003	-0.002	0.002	0	0	0.7569	-0.0129	15.04.17.307.12.312.0.1	
596153	7	15:34:58.35.55491833	139.65617500	0.002	0.001	0.0	0	0	0.7569	-0.0129	15.04.17.307.12.312.0.1	

Figure 37 制御履歴



(V25) パラシュート脱出試験

○ 目的

CanSat がパラシュートに覆われた状態で着地した場合でも分離後にパラシュート内から脱出できることを確認する。

○ 試験/解析内容

CanSat がパラシュートに覆われた状態にする。その状態からパラシュートの分離を行い、走行することでパラシュート内から脱出できることを確認する。

○ 結果

試験の動画を以下の URL に示す。

URL (1 回目) : <https://youtu.be/2z3iXNM4yL8>

URL (2 回目) : <https://youtu.be/HUFO1VlhD2c>

動画より、パラシュートの分離を行った後の走行によりパラシュート内から脱出できることが確認できた。

○ 結論

CanSat がパラシュートに覆われた状態で着地した場合でも分離後にパラシュート内から脱出できることが確認できた。

## 第7章 工程管理、ガントチャート（スプレッドシートを推奨）

各担当（ハード・ソフト・全体などの進行状況を記入）

### 1. ハード

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1mMOKbx4Eyp2bTWz12u9z3w71lu-Gifn/edit#gid=1913549020>

### 2. ソフト

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1mKnTqEAQC0MAydrfn3pQNdgBb5kbDbG/edit#gid=1333870815>

## 第8章 大会結果報告

### 1. 目的

製作した CanSat で設定したミッションを成功させるため.

### 2. 結果・考察

大会全体を通した結果を Table 15 に示す. また, 各投下における詳細な結果を Table 16 に示す.

#### ① 投下 1 回目

第 1 回投下では落下衝撃により右タイヤのモータ線が抜けて走行不可能となり, ミッションが終了した. Figure 38 から着地ステートにおいてモータを動かして脱出するためにモータに指令値は与えているもののエンコーダの取得値が変化していないことからモータ線が抜けた影響によりモータが動かなくなったことが分かる.

#### ② 投下 2 回目

落下衝撃によりマイコン給電用の昇降圧が抜けて電源が落ち, ミッションが終了した. Figure 39 から running ステートに移行してすぐ, ミッションが終了していることが分かる.

#### ③ 投下 3 回目

第 3 回投下ではミニマムサクセス, フルサクセスともに達成した. 得られた結果について以下に示す.

まず, 探査機の推定位置としては, (7, 5) という座標が得られた. 一方で真値の座標は (7, 6) であるため, 誤差が 1m となっていることがわかる. Figure 40, Figure 41 から, 以上の結果が読み取れる. 推定位置と真値の誤差が 1m であり, フルサクセスの目標である 5m よりも小さくなっていることから, フルサクセスを達成していることがわかる.

しかし, 課題としてはパラシュートが絡まってしまったことが挙げられる. Figure 42 からわかるように, CanSat がパラシュートを引きずりながら走行してしまった. そのため, CanSat が十分に走行することができず, 計測地点が密集してしまった.

Table 15 ACTS2021 大会結果

投下	ミニマムサクセス	フルサクセス
1 回目	失敗	失敗
2 回目	失敗	失敗
3 回目	達成	達成

Table 16 ACTS2021 大会結果詳細

	ステート	試験内容	結果
1回目	準備	地上局との通信開始	成功
		GPS情報の取得	成功
		収納検知により通信停止	成功
		キャリアへ搭載	成功
	放出 降下 着地	放出検知により通信再開	成功
		着地検知によりパラシュートの分離	成功
	移動	通信開始地点へ走行	成功
	通信	探査ローバとの通信開始	成功
		永久影外周の走行	失敗
		RSSI値の取得	成功
		距離推定	成功
	測位	相対測位	成功
解析	真値の計測 SDカードの記録の確認	成功	
2回目	準備	地上局との通信開始	成功
		GPS情報の取得	成功
		収納検知により通信停止	成功
		キャリアへ搭載	成功
	放出 降下 着地	放出検知により通信再開	失敗
		着地検知によりパラシュートの分離	失敗
	移動	通信開始地点へ走行	失敗
	通信	探査ローバとの通信開始	失敗
		永久影外周の走行	失敗
		RSSI値の取得	失敗
		距離推定	失敗
	測位	相対測位	失敗
解析	真値の計測 SDカードの記録の確認	失敗	
3回目	準備	地上局との通信開始	成功
		GPS情報の取得	成功
		収納検知により通信停止	成功
		キャリアへ搭載	成功
	放出 降下 着地	放出検知により通信再開	成功
		着地検知によりパラシュートの分離	失敗
	移動	通信開始地点へ走行	成功
	通信	探査ローバとの通信開始	成功

		永久影外周の走行	成功
		RSSI 値の取得	成功
		距離推定	成功
	測位	相対測位	成功
	解析	真値の計測 SD カードの記録の確認	成功

0 : 準備ステート

2433,0,16:10:32,35.41282333,138.59307333, 0.0, 0.0,0.001, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0.0  
 2491,0,16:10:32,35.41282333,138.59307333,-0.024,-0.002, 0.0, 0, 0, 0, 0, 0, 0.0  
 2547,0,16:10:32,35.41282333,138.59307333,-0.013, 0.0,0.011, 0, 0, 0, 0, 0, 0.0

~中略~ 1 : 収納ステート

22485,0,16:10:52,35.41283000,138.59306000,0.181,-1.724,0.347, 0, 0, 0, 0, 0, 0.55.125  
 22539,1,16:10:52,35.41283000,138.59306000,-0.047,-1.22,0.233, 0, 0, 0, 0, 0, 0.55.562  
 22593,1,16:10:52,35.41283000,138.59306000,-0.133,0.107,-0.001, 0, 0, 0, 0, 0, 0.55.625

~中略~ 2 : 放出ステート

218497,1,16:14:08,35.41293833,138.59328833,-13.197,2.803,1.074, 0, 0, 0, 0, 0, 0.279.625  
 218552,2,16:14:08,35.41293833,138.59328833,3.824,2.223,2.572, 0, 0, 0, 0, 0, 0.287.375  
 218609,2,16:14:08,35.41293833,138.59328833,-0.006,3.59,2.559, 0, 0, 0, 0, 0, 0.217.75

~中略~ 3 : 着地ステート

モータへの指令値

228552,3,16:14:18,35.41294500,138.59331000,-0.259,-0.171,-0.106, 100, 100, 0, 0, 0, 0.235.938  
 228610,3,16:14:18,35.41294500,138.59331000,-0.073,0.037,0.5, 100, 100, 0, 0, 0, 0.236.562  
 228666,3,16:14:18,35.41294500,138.59331000,0.376,-0.022,0.292, 100, 100, 0, 0, 0, 0.237.375

~中略~ 4 : 通信開始ステート

エンコーダの取得値

231240,3,16:14:20,35.41295167,138.59331333,0.28,-0.042,0.041, 100, 100, 0, 0, 0, 0.277.0  
 231295,4,16:14:20,35.41295167,138.59331333,-0.693,-0.011,-0.181, 0, 0, 0, 0, 0, 0.277.062  
 231349,4,16:14:21,35.41295000,138.59331667,-1.359,0.094,-0.146, 0, 0, 0, 0, 0, 0.277.312

Figure 38 投下 1 回目における制御履歴

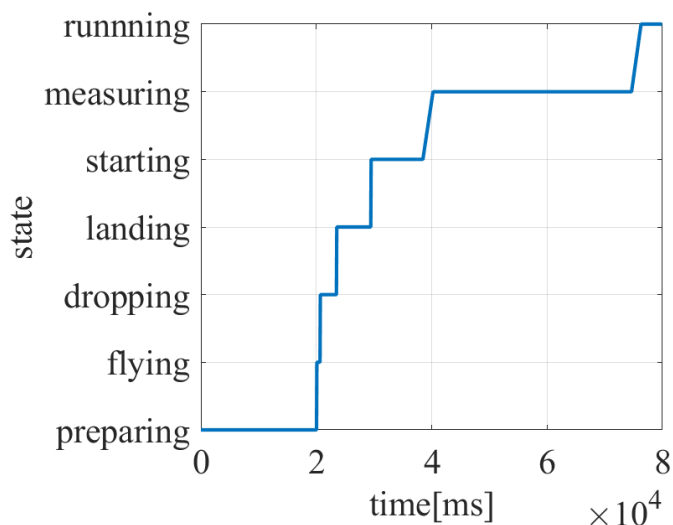


Figure 39 ステート移行の時刻歴

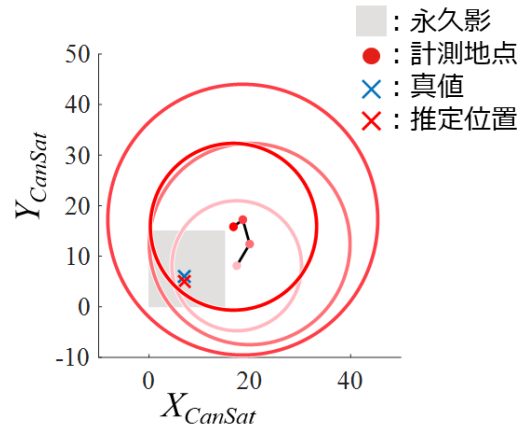


Figure 40 2次元の結果

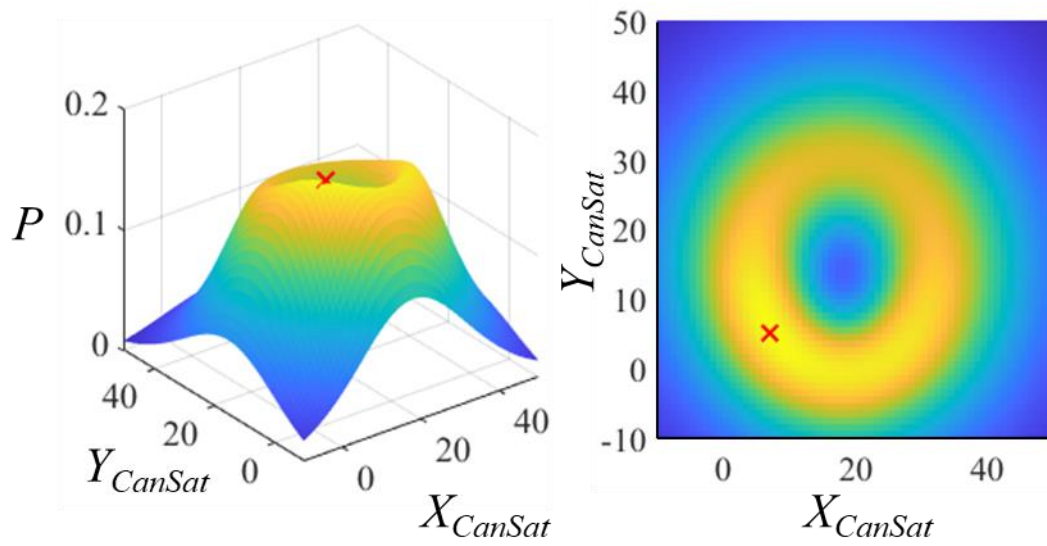


Figure 41 3次元の結果



Figure 42 走行の様子



### 3. 考察

#### ① 投下1回目

右タイヤのモータ線が抜けて走行不可能となってしまったため、ミニマムサクセスの達成もできなかった。モータ線が抜けた原因としてはホットボンドによる補強が十分でなく落下衝撃に耐えられなかったことやモータ線の圧着がうまくできていなかったことが原因だと考えられる。このことを踏まえた対策として、モータ線だけでなく他の配線やセンサ類のホットボンドによる補強とモータ線の圧着をやり直し、第2回の投下に挑んだ。

#### ② 投下2回目

落下衝撃でマイコン給電用の昇降圧が抜けて電源が落ち、ミッションが終了してしまったため、ミニマムサクセスの達成もできなかった。パラシュートを丁寧に畳みすぎて開傘が遅れ、着地までに十分な減速ができず落下衝撃が大きくなったことが原因だと考えられる。このことを踏まえた対策として、パラシュートの折りたたみ方をゆるめにし、第3回の投下に挑んだ。

#### ③ 投下3回目

上述した結果から、位置推定については比較的良好な結果が得られたといえる。一方で、走行に関しては、パラシュートが絡まるという問題が発生した。この原因としては、パラ分離の走行時に、パラシュートから離れる方向に走行できなかったことが考えられる。パラシュートが絡むことなく走行することができれば、より自己位置推定の精度が上がり、結果としていられる探査機の推定位置の精度も上がることが考えられる。

この問題点の解消方法としては2点考えられる。1点目は、ソフトによる対策である。具体的には、パラ分離時に走行する方向を、センサから読み取った CanSat の上下状態から決定する方法が考えられる。これにより、パラシュートから離れる方向に走行できる確率が高まるだろう。2点目は、ハードによる対策である。具体的には、そもそもパラシュートがタイヤに絡まらない機構を実現することが考えられる。これにより、パラシュートが絡まらず、草地での走破性能も向上することが考えられる。

しかし、パラシュートが絡まったにも関わらず、ミッションをフルサクセスできたことは評価すべき点である。こちらの成功要因は、タイヤが動かなくなってしまう場合にも、位置推定を継続できるようなアルゴリズムを構築したことにあると考えている。実際、ミッション終盤で、パラシュートの絡まりにより、片方の車輪が回転しなくなってしまった。その際、エンコーダの値が得られなくなってしまうが、上記のアルゴリズムにより、継続的に自己位置推定と他己位置推定を実行できた。これにより、ミッションを最後まで実行できたと考えられる。

## 第9章 まとめ

### 1. 工夫・努力した点（ハード、ソフト、マネジメント面すべて）

- ハード
  - パラシュート分離機構を従来の塩ビ板と焼き切りを用いずにサーボモータとバネの復元力を使用することにより、シンプルかつ軽量の構造を実現したこと。
  - フランジにキー溝を追加する加工により、カップリングとの結合力を増加させたこと。
  - 従来我々は AUTODESK を使用していたが、FUSION360 に移行することにより、複雑で精度の高い落下シミュレーションを行うことができたこと。またクラウドで共同編集が可能であるため、複数人で同時作業ができ、短期間で実機完成ができたこと。
  - 大学の切削加工センターの職員の方々に依頼加工をお願いすることで、精度の高い部品を結果的に低コストで素早く製作することができたこと。
- ソフト
  - LoRa 無線通信と GPS モジュールの複数 UART 通信を用いるため、複数 UART 機能を備えた Raspberry Pi 4 を使用
  - 誤差の大きな RSSI を用いるため、CanSat 側と探査機側の RSSI 距離換算近似式をそれぞれ算出することで片方側のみ使用する場合の 2 倍のサンプル数を獲得し、ばらつきの影響を軽減
  - 各測位地点において RSSI の中央値を算出し、外れ値を除外することで精度向上
  - 走行時、地磁気センサを用いた比例制御を行うことで、両車輪のモータ特性によらず直進の走行を実現
  - キャリアからの放出後の落下時、パラシュート分離用のサーボモータを一定値に制御し続けるプログラムを書くことで、落下中にサーボモータが緩むことを防止
  - GPS の誤差を考慮するために、事前に永久影の大きさを数m大きく設定することで、永久影の侵入を防止
  - 最終的な推定距離の評価を行う際に、絶対座標ではなく相対座標で評価を行うことで GPS の誤差を無視
  - 3次元の円を重ね合わせ、確率分布としてみなすことで最も存在確率の高い一点を推定位置として算出
  - オドメトリ時の CanSat 姿勢角に地磁気センサの値を用いることで誤差抑制
  - スタック時にその場回転の脱出方法を行うことで自己位置の誤差を小さくした
  - スタック時に一定サンプル数自己位置を戻すことでスタック判定までの誤差を軽減
  - パラシュートから離脱するとき、加速度センサで落下姿勢を判定し二通りの離脱方法を実装することでパラシュートに向かって走ることを抑制
  - GitHub を用いた共同開発を行い、編集履歴の保存を行った。

- 回路
  - 各色の LED を付けることで目視でステートの確認が可能
  - シャットダウンボタンを付けることで簡便なリスタート
  - ベタグラウンド処理を行うことでノイズ軽減
  - モータの信号線, モータ本体と離れた位置に GPS と LoRa 無線通信モジュールを行うことで磁気の影響を軽減
  - 電源周りにバイパスコンデンサを配置しノイズ軽減
  - 回路発注時に固定用のドリル穴をあけることで, 手動で開ける際の断線防止かつタスク軽減
  
- マネジメント
  - コロナウィルスで状況が読めない中, 早めの計画をたてて実行したこと
  - メンバーのモチベーションや自主性を向上できるような雰囲気づくり

## 2. 課題点

- ハード
  - 今回は Pololu 製のモータを使用したが, サイズの合う専用のカップリングが存在せず, 他社のカップリングを使用した. そのため, モータの軸とカップリングがうまくかみ合わず遊びが発生し, ホイールオドメトリの上で大きな影響を及ぼしてしまった.
  - ホイールオドメトリを使用する際にモータのエンコーダが必要なため, サイズの大きいモータを選定する必要があった. そのため, 部品の配置の際に大きな障害となり, レギュレーション寸前の横幅となってしまった.
  - 草地でのバネの復元力を用いたパラシュート分離が思うように実現できなかった. メジャーに取り付けたブロックとアルミ製のブロックケースとの摩擦が原因となり, 結果的に地面の摩擦を利用した「パラシュートを置いていく形の分離」となってしまった.
  
- ソフト
  - GitHub のブランチ管理がおろそかになり目的のファイルがどこにあるかわからなかった.
  - 絶対パスを用いたファイル指定のインポートをしていなかったため同じファイルを実行フォルダに複製する必要があった.
  - 滑りに伴う自己位置推定精度の劣化
  - スタック判定に用いる閾値の設定と, 自己位置を戻すサンプル数の検討
  - 距離推定式が環境依存のため, 実験方法によって大きく依存
  - スタック回避時の離脱方法をその場回転にしたことで, パラシュートと絡まってしまった.

- 回路
  - 回路が正常に動作していない場合の原因特定
  - ハードと関与しないセンサ位置の決定
  - スペースを有効活用した回路の縮小
  - センサと回路をつなげる際に用いたコネクタの接触不良
  - 昇降圧を介した電源供給
- マネジメント
  - タスクの偏りが生じてしまったこと

### 3. 今後の展望

- ハード
  - サーボモータとバネの復元力を用いたパラシュート分離機構により、大きな軽量化を図ることができたため、本機構を活用し他の機構を複雑化する。
  - タイヤとカップリングとの遊びの防止のため、市販に専用のカップリングが存在しない場合には、キー溝を付加した自作のカップリングを製作する。
  - 重量及び幅のレギュレーションを余裕をもってクリアするために、3DCAD 上での組み立て段階の前に、詳細な部品の調査を行う。
- ソフト
  - 自己位置推定の精度向上のため拡張カルマンフィルタの実装。
  - オドメトリ時のコードをメインとは別に並列処理することで誤差軽減。
  - その場回転以外のスタック回避方法の検討。
  - RSSI の平均値や分散に応じた重みを導入して足し合わせることで、精度が良いと判断される推定値の寄与を大きくする。
  - GitHub を用いた共同開発のルールを設定し、開発者全員が見やすく使いやすいコード生成を心がける。
- 回路
  - ハード班と綿密なやり取りを行い、干渉しないセンサ配置と回路基板の大きさを決定する。
  - センサと回路間の接触の良いコネクタを導入。場合によってはセンサを回路に直接固定する。
- マネジメント
  - 完成までの流れを明確にメンバーに共有することでさらなる自主性の向上