

GNSS スプーフィング攻撃に対する GNSS/IMU 複合航法システムの脆弱性分析

八杉尚樹（大阪公立大学）
辻井利昭（大阪公立大学）

Analysis of GNSS/IMU Vulnerability to GNSS Spoofing Attacks
Naoki Yasugi (Osaka Metropolitan University)
Toshiaki Tsujii (Osaka Metropolitan University)

Key Words: GNSS, Spoofing, Coherent Attack, Inertial Measurement Unit, loosely coupled

Abstract

Global Navigation Satellite Systems (GNSS) are vulnerable to spoofing attacks. Therefore, this study aims to develop a system that can detect spoofing attacks and use an alternative navigation system which is independent of satellite signals. Prior to this study, we analyzed the vulnerability of GNSS/IMU navigation systems using an autonomous multicopter.

1. はじめに

GNSS（Global Navigation Satellite System）によって測定される位置，時刻情報はスマートフォン，自動車，船舶，航空機など多岐にわたる分野で利用されている．近い将来，空飛ぶクルマ，電動垂直離着陸（eVTOL）機の社会実装，市場拡大に伴い，GNSS の利用も拡大すると予測される．一方で，外部からのジャミング（妨害波）やスプーフィング（欺瞞信号）により，GNSS の信頼性が脅かされる懸念も存在する．実際に，世界中で様々なスプーフィング攻撃の事例が報告されており，技術の進歩に伴ってスプーフィング攻撃はますます一般的になってきている．

そのため，スプーフィング攻撃を検知し，衛星とは独立した IMU やカメラの複合航法システムに切り替えることで，スプーフィング攻撃に対抗するシステムの構築を目指している．このアプローチは，一般的な自動車や航空機等で使用されているセンサのフュージョン技術により実現され，利用者の利便性の向上が期待される．さらに，故意的な欺瞞信号や妨害波だけでなく，マルチパス環境などの GNSS 信号の受信品質が低下する状況でも，測位の精度と信頼性が向上する．本稿では，スプーフィング対抗手法の研究として，巧妙なコヒーレント攻撃が成功した実証データの取得を目的とした．また，自動飛行中のマルチコプターの測位の乗っ取りを通して，GNSS/IMU 複合航法の脆弱性を分析した．

2. スプーフィング攻撃について

GNSS 信号の妨害は，攻撃側の意図や使用される機器に応じて様々な方法が存在し，スプーフィング攻撃にも複数の種類がある．本章では，スプーフィングの中でも特に議論されるノンコヒーレント攻撃とコヒーレント攻撃について詳述する．コヒーレント攻撃は，時間，位置，ドップラー周波数，擬似距離が真の信号と十分に同期した信号によるスプーフィング攻撃を指す．一方で，ノンコヒーレント攻撃は，これらが非同期の信号によるものを指す．表 1 に両手法の特徴を示す．

表 1 スプーフィングの種類と特徴

項目	ノンコヒーレント攻撃	コヒーレント攻撃
真の信号との類似性	低い	高い
信号強度	強い	弱い
機器コスト	安価	高価
実施の難易度	低い	高い
発生確率	高い	低い
検知の難易度	低い	高い

2. 1 ノンコヒーレント攻撃

ノンコヒーレント攻撃は、安価な SDR (Software Defined Radio) とオープンソースソフトウェアを使用して簡単に実現できる。図 1 の左は、正常に真の信号を追尾 (Tracking) している受信機に対して、ノンコヒーレント攻撃が行われている状況を示す。真の信号よりもやや大きい信号強度のスプーフィング信号で攻撃を行っているが、これでは受信機の真の信号の追尾を外すことはできない。一般的に、非同期の信号で真の信号の追尾を外すには、真の信号よりもおよそ 30dB 以上に大きい信号強度が必要である。図 1 の右は、スプーフィング信号の信号強度が真の信号よりも十分に上回っている状況を示す。受信機の真の信号の追尾が外れ、新たに信号の捕捉 (Acquisition) が行われるが、このとき、信号強度が大きいスプーフィング信号を補足し追尾する。このように、ノンコヒーレント攻撃では、真の信号と十分に同期が取れていないが、十分に強力なスプーフィング信号で測位を乗っ取ることができる。受信機の SNR (Signal-to-Noise Ratio) が異常な上昇を示すため、検知は比較的容易であるが、スプーフィング信号の信号強度が真の信号強度を十分に上回る範囲内で、不特定多数の対象がスプーフィング被害を受ける恐れがある。

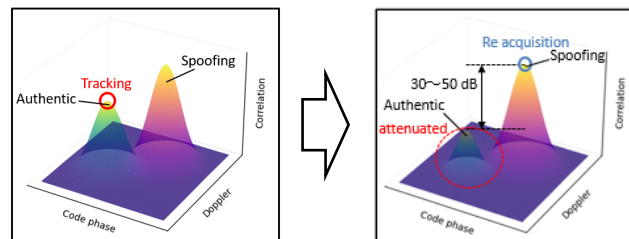


図 1 ノンコヒーレント攻撃

2. 2 コヒーレント攻撃

コヒーレント攻撃は、真の信号と十分に同期した信号を用意するため、高価な Spoofer の用意が必要である。図 2 の左は、正常に真の信号を追尾している受信機に対して、コヒーレント攻撃が行われている状況を示す。スプーフィング信号は真の信号と十分に同期しているが、信号強度が真の信号よりもやや小さいため、受信機の真の信号の追尾を外すことはできない。一般的に、同期の信号で真の信号の追尾を外すには、真の信号よりもおよそ 5~10dB 以上に大きい信号強度が必要である。図 2 の右は、スプーフィング信号の信号強度が真の信号を上回っている状況を示す。このとき、受信機は信号強度の大きいスプーフィング信号を追尾する。このように、コヒーレント攻撃では、真の信号と十分に同期が取れているため、真の信号よりも少し大きいスプーフィング信号で測位を乗っ取ることができる。受信機の SNR は異常な上昇を示さず、検知は比較的困難であるため、受信機は気づくことなく、偽信号を追尾し誤誘導を引き起こされる恐れがある。一方で、現実的には、真の信号の追尾を奪った直後は、偽信号が Early-Late コリレータ内に留まり相関波形が乱れ、わずかながら測位がノイジーになるため、この特徴に着目した検知は考えられる。また、複数の対象と信号の同期を取ることは不可能であるため、不特定多数の対象がスプーフィング被害を受ける可能性は低い。



図 2 コヒーレント攻撃

3. マルチコプターに対する GNSS スプーフィング攻撃実験

スプーフィング実験は、高コストの偽信号生成機器（スプーファ）と屋外での偽信号放射に関する法的規制のため、実証実験の実施に多くの制約が伴う。そのため、著者らはこれまで、難易度が高いコヒーレント攻撃や、法律上の規制が厳しい屋外での実験には至っていなかった。

その中で、一般社団法人測位航法学会（IPNTJ）会員による有志で組織された Spoofing/Jamming の実証実験と測位業界への貢献を目的とした研究会に参加することになった。これには、JAXA 航空宇宙技術部門、JAXA つくば第一宇宙技術部門衛星測位ユニット、東京大学空間情報科学研究センター、東京海洋大学学術研究院海事システム工学部門など多くの団体が参加している。無線従事者の監督の下、コヒーレント攻撃で屋外の無線環境での実験が可能となった。

本章では、コヒーレント攻撃への対抗手段を検討するという目的のため、自動運転のモビリティがスプーフィング攻撃を受ける状況を想定し、屋外の無線環境で実験について述べる。

3. 1 実験環境

実験は 2024 年 6 月 21 日に福島ロボットテストフィールドの市街地フィールドで実施した。図 3 に実験の状況、図 4 に GPS のスカイプロットを示した。攻撃対象の移動体としてマルチコプターを使用し、管制室で生成したスプーフィング信号をオープンスカイの環境で飛行する対象に向けて放射した。



図 3 実験の状況

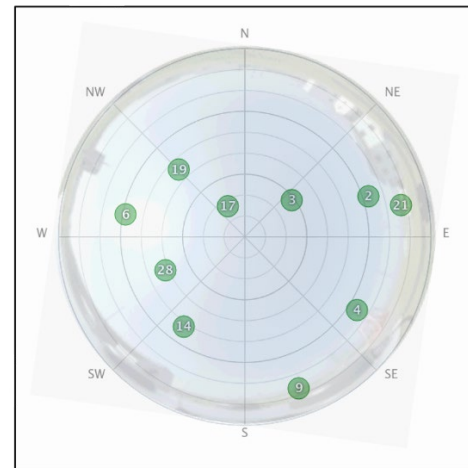


図 4 GPS のスカイプロット

3. 2 機器構成

図 5 に機器のブロック線図を、表 2,3 に実験機器の一覧、表 4 にマルチコプターの機体情報を示す。

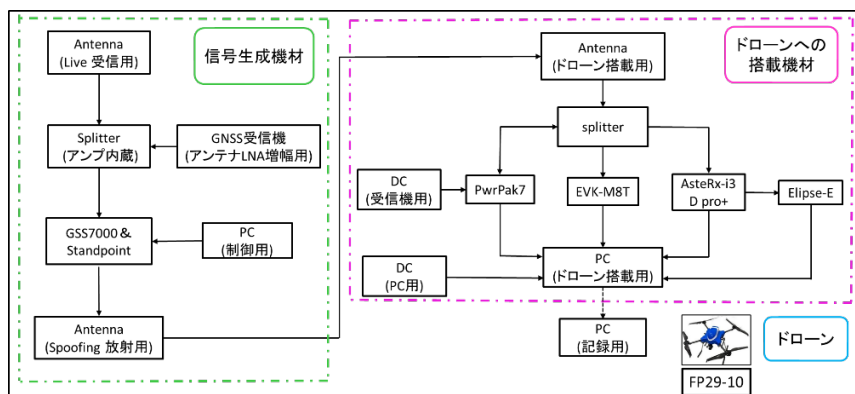


図 5 マルチコプターに対する GNSS スプーフィング攻撃実験のブロック線図

表 2 スプーファの試験機器一覧

No.	名称	型番	メーカー
1	GNSS シミュレータ	GSS7000	Spirent
2	Reference Receiver	Standpoint	Spirent
3	Antenna Live 受信用	PolaNt-x MF	Septentrio
4	Antenna Spoofing 放射用	M1575HCT-22P-SMA	MAXTENA
5	GNSS 受信機	PolaRX2e	Septentrio
6	Splitter	NALDCBS1X4-N	GPS Source

表 3 マルチコプターに搭載した試験機器一覧

No.	名称	型番	メーカー
1	マルチコプター	FP29-10	東京航空計器株式会社
2	Antenna	33-7972-00-2000	Tallysman
3	GNSS 受信機	PwrPak7	Novatel
4	GNSS 受信機	EVK-M8T	u-blox
5	GNSS 受信機&IMU	AsteRx-i3 D pro+	Septentrio
6	IMU	Elipse-E	SBG
7	Splitter	S14-TF	GPS Source

表 4 マルチコプターの機体情報

製造者名：東京航空計器株式会社	最大速度：54km/h
機体名称：FP29-10	耐風性能：12m/s 以下
寸法：W1600 x D1600 x H600mm	飛行可能時間：20min
使用周波数：(操縦) 2.4GHz (画像) 5.7GHz	ペイロード：6kg
通信可能距離：1.5km	通信可能距離：1.5km
重量（最大離陸重量）：17kg 以下	直近の整備・点検の結果：良好
製造番号：9007	実施前点検の有無：有
登録番号：JU3226034111	実施中止基準：
機体種類：クアッドマルチコプタタイプ	風速 10m/s 以上

3. 3 実験手順

表 5 に実験手順を示す．最初にマルチコプターに搭載した受信機で計測を開始し，マルチコプターを任意のホームポイントから離陸させた．その後，マルチコプターはホバリングポイントに向かい，そこで自動運転モードで終始ホバリングを行うように指示した．この状況でコヒーレント攻撃を実施し，GPS の測位を北上するように乗っ取り，マルチコプターの運動を検証した．最後にコヒーレント攻撃を停止した後，マルチコプターの運動を記録し，着陸を確認した後に受信機の記録を終了した．

表 5 実験手順

手順	マルチコプター	Spoofers
準備	ホームポイントから離陸 ホバリングポイントに移動	
Phase 1	自動運転モードでホバリングを指示	時刻同期コンフィギュレーションの実行
Phase 2	〃	コヒーレント攻撃の実行
Phase 3	〃	モーションシナリオの実行
Phase 4	ホバリングポイントに帰還 ホバリングポイントで着陸	コヒーレント攻撃の終了

3. 4 スプーフィングシナリオ

図 6 にスプーフィング信号のモーションシナリオを示す．最初の 30 秒間はホバリングポイントと同じ測位解となるように，北緯 37.6307579519 度，東経 141.0145125617 度，対地高度 5m と設定した．そして，31 秒後から秒速 1 メートルで 28 秒間北上するシナリオとした．

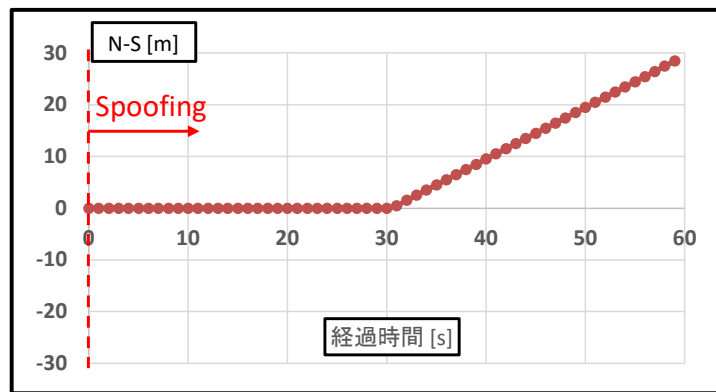


図 6 スプーフィング信号のモーションシナリオ（南北方向）

4. 結果・考察

本章では，マルチコプターに対する GNSS スプーフィング攻撃実験の結果と考察を示す．4.1 節から 4.4 節に示す結果と考察について，表 6 にまとめる．

4.1 節では，マルチコプターの運動の様子を示す．表 5 の実験手順の Phase1～4 について，現象の考察を示す．4.2 節では，運航用受信機と運航用 IMU の計測結果を示す．ここで，運航用とはマルチコプターの運動を制御するために用いられているものという意味で用いる．4.3 節では，評価用受信機と評価用 IMU の計測結果を示す．ここで，評価用とはスプーフィング対抗手法の研究のため，運航用とは別に，実験データの取得を目的としてマルチコプターに搭載したものという意味で用いる．最後に 4.4 節では，4.3 節で示した計測データを基に解析した評価用受信機と評価用 IMU の複合航法測位解の結果を示す．ここで，複合航法の計算には GNSS/IMU プログラムの Ninja[3]を用いた．

表 6 第 4 章の節立て

節の番号	項目
4.1	マルチコプターの運動の様子
4.2	運航用受信機と運航用 IMU の複合航法測位解の計測結果
4.3	評価用受信機と評価用 IMU の計測結果
4.4	評価用受信機と評価用 IMU の複合航法測位解の解析結果

4. 1 マルチコプターの運動の様子

本節では、GNSS スプーフィング攻撃を受けたマルチコプターの運動について、考察を示す。図 7 にマルチコプターの運動の状況を示す。

まず初めに、コヒーレント攻撃開始前（Phase1）で、マルチコプターはホバリングポイントに到着し、安定した飛行を確認した。続いて、コヒーレント攻撃開始後（Phase2）で、マルチコプターの不規則運動を確認した。これは、コヒーレント攻撃によって測位に利用される衛星数が減少し、正確な位置情報の取得が不安定になったためであると考えられる。理想的なコヒーレント攻撃では、偽信号の信号強度を徐々に上昇させ、測位に利用している衛星信号を真の信号から偽信号に入れ替えることで、対象に気付かれることなく測位を乗っ取ることができる。しかし、本実験ではマルチコプターの測位に利用される衛星数の減少が実際に確認されており、対象に気付かれてしまう結果となった。本実験では信号強度の微妙な調整に苦戦したためであると考えられる。

次に、モーションシナリオ開始後（Phase3）で、マルチコプターの南下を確認した。これは、対象がコヒーレント攻撃による測位の乗っ取りを受け、マルチコプターの運航用受信機の位置出力が北上したため、ホバリングを継続するための南下の制御入力が働いたと推測される。今回の実験では、マルチコプターの運航用受信機の測位解を出力できず、測位結果の北上を実験データとして確認することはできなかった。よって、現象の解明にはマルチコプターの運航用受信機の測位解を出力できる仕組みが必要である。また、マルチコプターの南下のタイミングがモーションシナリオ開始のタイミングと一致していたことから、マルチコプターは、スプーフィング信号を測位に利用しており、測位の乗っ取りに成功していると考えられる。

最後に、コヒーレント攻撃終了後（Phase4）で、マルチコプターのホバリングポイントへの帰還が確認された。これは、コヒーレント攻撃が終了し、対象が真の信号を測位に利用し、正しい自己位置を認識することができたため、ホバリングポイントへ帰還するための正しい制御入力が働いたと考えられる。

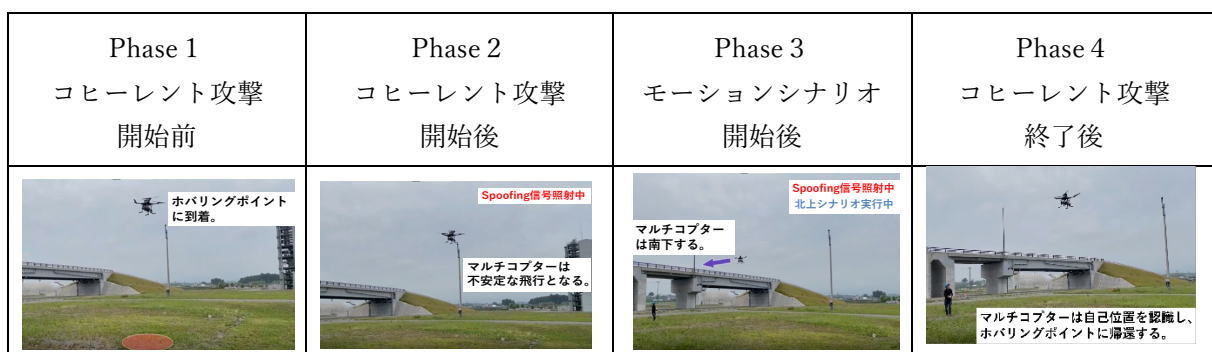


図 7 マルチコプターの運動の状況

4. 2 運航用受信機と運航用 IMU の複合航法測位解の計測結果

本節では、図 8 に運航用受信機と運航用 IMU の複合航法測位解を示し、これについての考察を述べる。表 7 にコヒーレント攻撃のフェーズ移行時刻を記載し、以降の実験結果の図では線で示す。

まず、コヒーレント攻撃開始前では、マルチコプターはホバリングポイントに移動したため、測位解も変動している。また、ホバリングポイント到着以降は、N-S 方向、E-W 方向、高度計のいずれもがほぼ一定の値で推移しており、実際のマルチコプターのホバリングと整合性が取れている。続いて、コヒーレント攻撃開始からモーションシナリオが開始されるまで、N-S 方向、E-W 方向、高度計の全てで値のわずかな変動を確認した。この時、マルチコプターは不規則運動を確認していたため、測位解のわずかな変動は妥当であると考えられる。

次に、モーションシナリオの開始からコヒーレント攻撃の終了まで、N-S 方向、E-W 方向で約 2 [m] の値の変動を確認した。しかし、この時マルチコプターは N-S 方向に -30[m] の大きな移動を確認しているため、この測位解は妥当でない。また、高度計について、高度指令値と MG200 の計測値が急上昇していることも確認した。以上より、モーションシナリオの開始に伴って、マルチコプターの複合航法システムは、正確な測位解を算出できなくなっていることが判明した。

最後に、コヒーレント攻撃の終了後で、N-S 方向の測位解が南下し、その後北上した。これは、マルチコプターの正常な測位が回復し、まずは自己位置が南になっていることを認識し、その後ホバリングポイント帰還のために北上したためであると考えられる。また、E-W 方向ではわずかながら測位結果が西方向に移動し、その後東方向へと移動した。これも同様に、まずは自己位置が西になっていることを認識し、その後ホバリングポイント帰還のために東方向へと移動したためであると考えられる。高度計についても、異常であった計測値から、実際の高度と整合性の高い計測値へと回復した。

以上より、測位が乗っ取られたと考えられる運航用受信機に、GNSS と独立した位置センサである IMU を複合しても、正しい測位を取り戻すことができないと判明した。

表 7 フェーズ移行時刻

名称	GPST	JST	線の種類
コヒーレント攻撃の開始時刻	01:58:36	10:58:18	---
モーションシナリオの開始時刻	01:59:07	10:58:49	---
コヒーレント攻撃の終了時刻	01:59:35	10:59:17	—

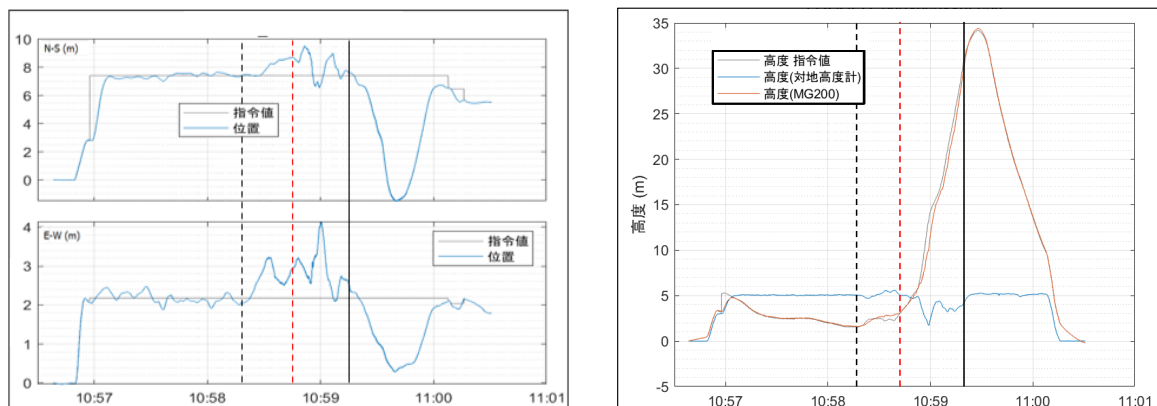


図 8 マルチコプターの運航用受信機と運航用 IMU の複合航法測位解

4. 3 評価用受信機と評価用 IMU の計測結果

本節では、評価用受信機と評価用 IMU の計測結果についての考察を示す。はじめに、評価用受信機の EVK-M8T (u-blox) の計測結果を示す。測位解は計測した擬似距離を RTKLIB[2]で後処理し、単独測位を行ったものを示す。次に、評価用 IMU の AsteRx-i3 D Pro+ (Septentrio) と Ellipse-E (SBG Systems) について、加速度センサとジャイロセンサの計測結果を示す。

● 評価用受信機

図 9, 11 に信号強度の変動を示す。コヒーレント攻撃の開始より、信号強度の上昇が僅かに確認された。本実験の前に行った実験では、コヒーレント攻撃での測位の乗っ取りには実信号の信号強度を 5 ~ 10dB 程度上回る偽の信号の信号強度が必要であるという知見を得た。よって、これは対象の測位を乗っ取るには不十分な信号強度であると考えられる。

図 10, 12 は測位解の変動を示す。図 10 では、コヒーレント攻撃の開始から約 30 秒間、測位解が得られなかった。これは、スプーフィングの信号強度が不足し、真の信号と同程度の信号強度で受信されたので、受信機が想定する信号捕捉の状態が乱されたためと考えられる。GPS 信号のみを受信する設定としていたため、GPS の偽信号の影響を大きく受けた。一方で、図 12 では、コヒーレント攻撃を開始から約 10 秒間、測位解が得られなかった。こちらは、マルチ GNSS 信号を受信する設定としていたため、GNSS 受信障害の範囲は小さく留まったと考えられる。また、北上のモーションシナリオの開始からコヒーレント攻撃を停止するまでの間、図 10, 図 12 のいずれも N-S 方向を含む測位解は実際のマルチコプターの位置を捉えているため、測位を乗っ取ることに失敗したと考えられる。

よって、本実験では、評価用受信機に対してコヒーレント攻撃による測位の乗っ取りを試みたが、偽の信号の信号強度の不足により、失敗したと考えられる。

● 評価用 IMU

図 13, 15 に加速度センサの計測結果を示す。GPST の 1:57:00 頃までは、X 軸方向加速度と Y 軸方向加速度は約 0 [m/s²] の値を、Z 軸方向加速度は重力加速度の約 -9.8 [m/s²] の値を計測した。この時、マルチコプターは離陸を開始していない状況であったため、この計測は妥当であると考えられる。続いて、GPST の 1:57:00 頃以降では、X 軸方向加速度と Y 軸方向加速度は平均が約 0 [m/s²] となるバラツキの大きいデータを計測した。また、Z 軸方向加速度は重力加速度は平均が約 -9.8 [m/s²] となるバラツキの大きいデータを計測した。この時、マルチコプターは自動運転モードでホバリングを指示されている中、機体の動乱やコヒーレント攻撃による機体を乗っ取りが発生したため、所々で瞬間的に大きな加速度を計測していることは、自然であると考えられる。

次に、図 14, 16 にジャイロセンサの計測結果を示す。GPST の 1:57:00 頃までは、3 軸周りの角速度は約 0 [°/s] の値を計測した。また、GPST の 1:57:00 頃以降では、3 軸周りの角速度は平均が約 0 [°/s] となるバラツキの大きいデータを計測した。これらの計測は、前述のマルチコプターの運動を踏まえ、妥当であると考えられる。

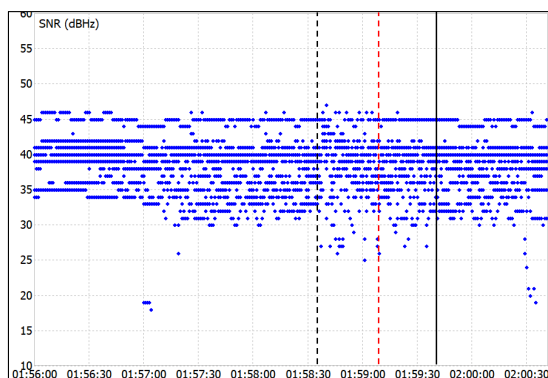


図 9 信号強度の変動 (EVK-M8T)

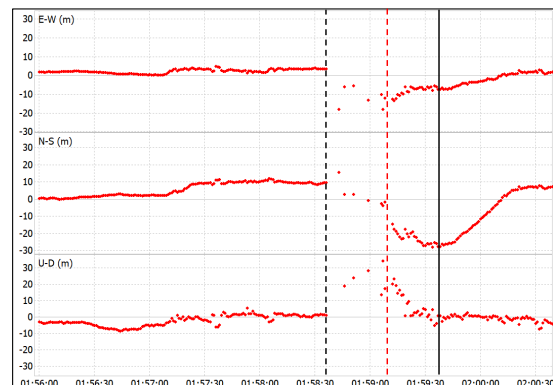


図 10 測位解の変動 (EVK-M8T)

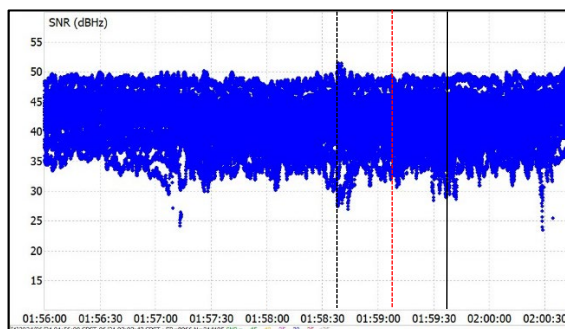


図 11 信号強度の変動 (PwrPak7)

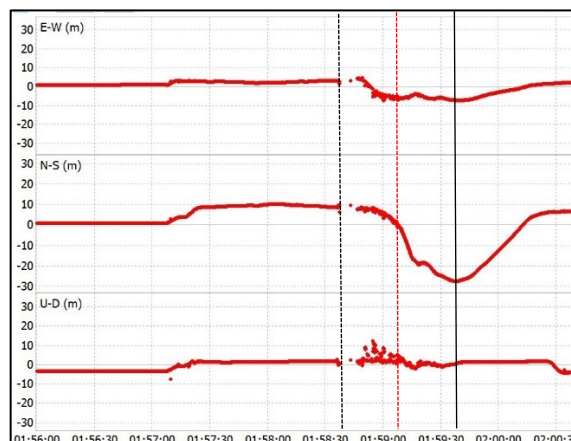


図 12 測位解の変動 (PwrPak7)

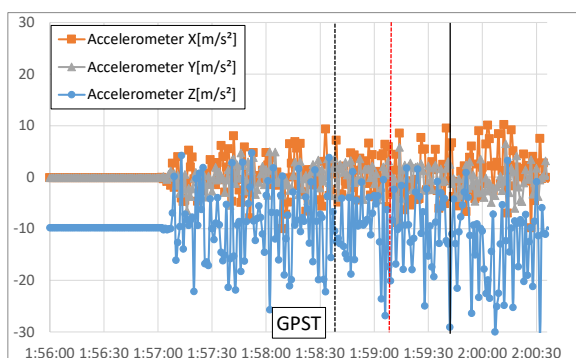


図 13 加速度センサの計測結果
(AsteRx-i3 D Pro+)

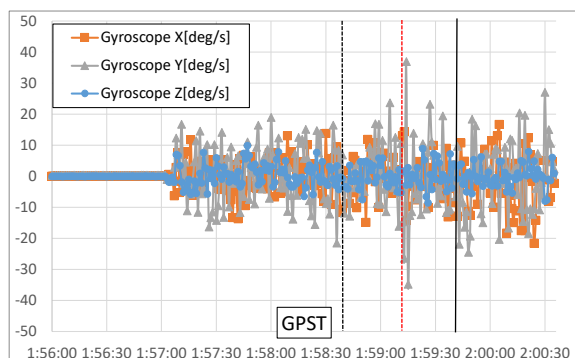


図 14 ジャイロセンサの計測結果
(AsteRx-i3 D Pro+)

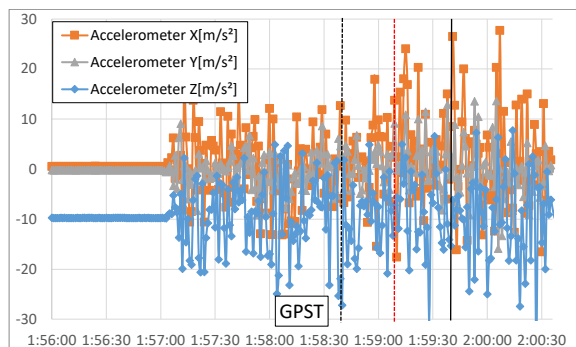


図 15 加速度センサの計測結果
(Ellipse-E)

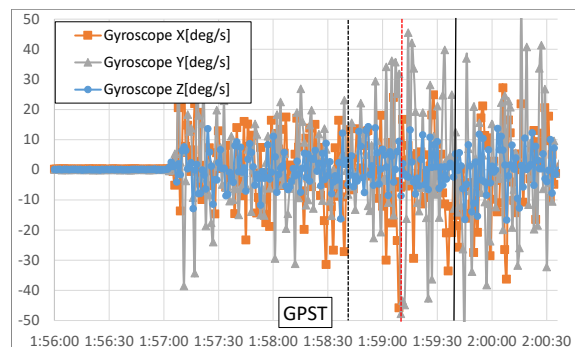


図 16 ジャイロセンサの計測結果
(Ellipse-E)

4. 4 評価用受信機と評価用 IMU の複合航法測位解の解析結果

4.3 節では、評価用受信機と評価用 IMU でマルチコプターの GNSS 測位のデータと加速度・ジャイロのデータを計測した。これらの計測データを GNSS/IMU 複合航法のプログラムである Ninja を用い、loosely-coupled 方式で計算した。本節では、図 17, 18 に GNSS 受信機の EVK-M8T と IMU センサの AsteRx-i3 D Pro+ の組み合わせ、図 19, 20 に GNSS 受信機の EVK-M8T と IMU センサの Ellipse-E の組み合わせについて、測位結果と測位誤差を示す。ここで、マルチコプターの位置の真値は、図 12 の PwrPak7 のマルチ GNSS の単独測位結果を用いている。よって、GPST の 1:58:36~1:58:46 は真値データが得られなかったため、この部分は除いた。また、表 8 に複合航法測位解の Phase ごとの誤差を示す。

- EVK-M8T（評価用受信機）と AsteRx-i3 D Pro+（評価用 IMU）の組み合わせ

まず、図 18 より、GPST の 1:57:00 頃までの ENU 方向の測位誤差はそれぞれ約 0 [m] となった。この時、マルチコプターは離陸を開始していない状況であり、高精度に測位解を算出できている。また、図 18 より、GPST の 1:57:00 頃のホバリングの開始からコヒーレント攻撃を開始まで、EN 方向の測位誤差は 0~5 [m] の水準となった。こちらも、GNSS/IMU 複合航法はある程度妥当な測位解を計算できている。しかし、U 方向の測位誤差では、10 [m] を大きく上回るものも見られた。EVK-M8T は GPS のみの計測であり、多くの衛星で広範囲の衛星仰角から対象を捉えることが難しかったためと考えられる。よって、これを利用した GNSS/IMU 複合航法の測位結果は、マルチ GNSS で計測した PwrPak7 と比較して、U 方向の測位誤差が大きくなったと考えられる。以上は、Phase1 に該当する。表 8 より、EN 方向は約 2 [m]、U 方向は約 8 [m] の測位誤差となった。

次に、図 18 より、コヒーレント攻撃の開始からコヒーレント攻撃の終了まで、ENU 方向の測位誤差は、5~10 [m] の水準となった。コヒーレント攻撃が及ぼす影響性は、EVK-M8T や PwrPak 7 などの GNSS 受信機の種類によって異なるため、EVK-M8T を利用した GNSS/IMU 複合航法の測位結果は、真値として用いた PwrPak7 との比較によって、測位誤差の水準が高くなったと考えられる。一方で、図 10 や図 12 ではコヒーレント攻撃を受けた直後に信号捕捉が妨害されたことで、測位結果の算出ができない時間帯があったが、図 17 の GNSS/IMU 複合航法では測位解を補完することができている。よって、短時間の GNSS 受信障害であれば、GNSS/IMU 複合航法のロバスト性により、ある程度の精度で測位の継続ができると考えられる。以上は、Phase2, 3 に該当する。表 8 より、Phase2 では EN 方向は約 7 [m]、U 方向は約 9 [m]、Phase3 では E 方向は約 5 [m]、N 方向は約 11 [m]、U 方向は約 6 [m] の測位誤差となった。

最後に、コヒーレント攻撃の終了以降、ENU 方向の測位誤差は 5 [m] の水準となった。コヒーレント攻撃を受けている時間帯と比較して、測位誤差は小さくなった。以上は、Phase4 に該当する。表 8 より、E 方向は約 3 [m]、N 方向は約 7 [m]、U 方向は約 6 [m] の測位誤差となった。

以上より、表 8 から複合航法の測位誤差は Phase2 や Phase3 のコヒーレント攻撃を受けている状況で大きくなった。一方で、図 10, 12 のように受信機単体での測位システムでは、コヒーレント攻撃により GNSS 障害を受けて測位が得られない時間帯があったが、GNSS/IMU 複合航法システムでは、短時間であればある程度妥当な測位を補完することができた。

- EVK-M8T（評価用受信機）と Ellipse-E（評価用 IMU）の組み合わせ

まず、図 20 より、GPST の 1:57:00 頃までの ENU 方向の測位誤差はそれぞれ約 0 [m] となった。また、GPST の 1:57:00 頃のホバリングの開始からコヒーレント攻撃を開始まで、EN 方向の測位誤差は 0~5 [m] の水準、U 方向は、10 [m] を大きく上回るものも見られた。これは、前述の内容と同様の傾向である。以上は Phase1 に該当し、表 8 より、E 方向は約 3 [m]、N 方向は約 2 [m]、U 方向は約 5 [m] の測位誤差となった。

次に、図 20 より、コヒーレント攻撃の開始からコヒーレント攻撃の終了まで、EN 方向の測位誤差は、5~10 [m] の水準、U 方向は 20 [m] を大きく上回るものも見られた。この組み合わせの方が、U 方向の測位誤差が大きくなる結果となった。以上は、Phase2, Phase3 に該当し、表 8 より、Phase2 では E 方向は約 8 [m]、N 方向は約 4 [m]、U 方向は約 18 [m]、Phase3 では E 方向は約 5 [m]、N 方向は約 4 [m]、U 方向は約 18 [m] の測位誤差となった。

最後に、コヒーレント攻撃の終了以降、EN 方向の測位誤差は 5 [m] の水準、U 方向は 20 [m] を大きく上回るものも見られた。以上は、Phase4 に該当する。表 8 より、E 方向は約 6 [m]、N 方向は約 3 [m]、U 方向は約 13 [m] の測位誤差となった。

以上より、表 8 から複合航法の測位誤差は Phase2 や Phase3 のコヒーレント攻撃を受けている状況で大きくなる傾向がほとんどで確認された。また、EVK-M8T（評価用受信機）と Ellipse-E（評価用 IMU）の組み合わせでは、U 方向の測位誤差が大きくなった。Ellipse-E の計測について、条件設定の見直しが必要であると考えられる。また、こちらも、コヒーレント攻撃の開始直後の GNSS 受信障害の間、ある程度妥当な測位を補完することができた。

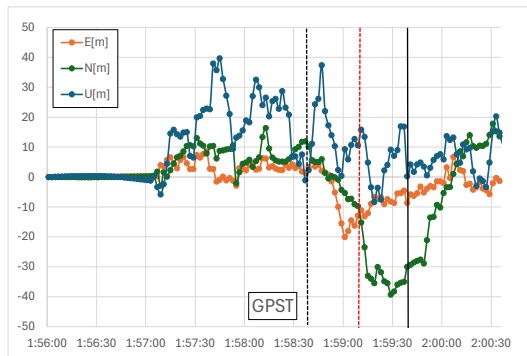


図 17 GNSS/IMU 複合航法の測位結果
EVK-M8T（評価用受信機）と AsteRx-i3 D Pro+（評価用 IMU）の組み合わせ

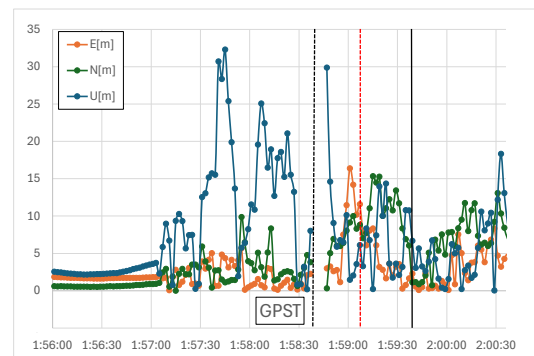


図 18 GNSS/IMU 複合航法測位解の測位誤差
EVK-M8T（評価用受信機）と AsteRx-i3 D Pro+（評価用 IMU）の組み合わせ

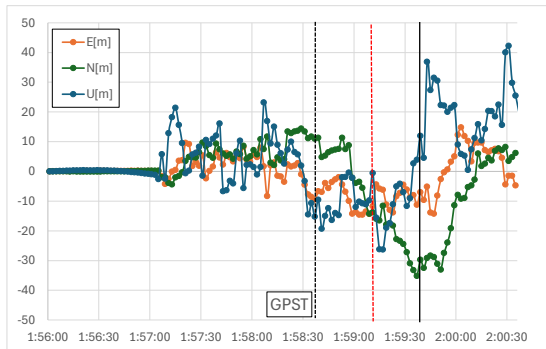


図 19 GNSS/IMU の複合航法の測位結果
EVK-M8T（評価用受信機）と Ellipse-E（評価用 IMU）の組み合わせ

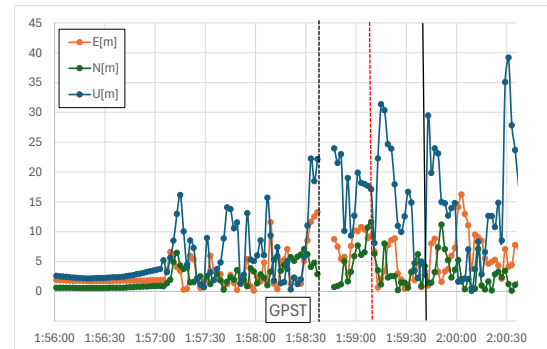


図 20 GNSS/IMU の複合航法測位解の測位誤差
EVK-M8T（評価用受信機）と Ellipse-E（評価用 IMU）の組み合わせ

表 8 複合航法測位解の誤差

	MVK-M8T & AsteRx-i3 D Pro+			EVK-M8T & Ellipse-E		
	E-N [m]	N-S [m]	U-D [m]	E-N [m]	N-S [m]	U-D [m]
Phase 1	1.804	1.971	8.280	2.917	2.141	5.390
Phase 2	7.241	6.608	8.986	7.930	3.891	17.56
Phase 3	4.873	11.23	6.051	4.687	3.977	18.46
Phase 4	2.993	6.607	5.799	6.096	2.934	13.05

5. 研究成果のまとめと今後の課題

本実験では、マルチコプターの測位に利用される衛星数の変化が確認されたことから、対象に気付かれないような理想的なコヒーレント攻撃は失敗に終わった。難易度の高いコヒーレント攻撃の研究を進めるため、これが成功するような信号強度の微妙な調整等の実験コンフィギュレーションの検討は、今後の課題である。

マルチコプターが北上のモーションシナリオの開始と同時に南下する様子を確認できた。よって、マルチコプターの運航用受信機はコヒーレント攻撃により、北向きに測位を乗っ取ることに成功していると推測できる。しかし、マルチコプターの運航用受信機の測位解を出力できなかったため、この現象は推測の範囲内の考察に留まってしまった。マルチコプターの運航用受信機の測位解を出力できる仕組みの検討も今後の課題として挙げる。

運航用 IMU は妥当性のある計測ができていと考えられる。そこで、測位が乗っ取られたと考えられる運航用受信機に、運航用 IMU を複合した測位解の妥当性を分析したが、このシステムはコヒーレント攻撃を受け、正確な測位解を算出できていないと考えられる。つまり、測位を奪われた GNSS 受信機を IMU と一般的な複合方法で複合しても、信頼性の高い航法システムを取り戻すことができないと言える。コヒーレント攻撃を受けても正確な測位解の提供を継続できるようなシステムの開発は今

後の課題である。

本実験では、マルチコプターの他に、評価用受信機にもコヒーレント攻撃を実施した。コヒーレント攻撃の開始直後は GNSS の受信障害を与え、測位解を算出できない時間帯が発生した。しかし、その後測位は復旧し、測位を乗っ取ることは失敗した。この評価用受信機に評価用 IMU をオープンソースである Ninja を用いて複合した測位解について考察したところ、受信機単体では GNSS 受信障害で測位解が算出できない時間帯も、複合航法システムではある程度妥当な測位解で補完することができた。短時間の GNSS 受信障害であれば、GNSS/IMU 複合航法システムのロバスト性により、ある程度の精度で測位の継続ができると考えられる。

6. 謝辞

本 Spoofing Test は測位航法学会『Jamming/Spoofing 勉強会』参加各機関の協力のもと行われました。Team Spoofing Test@福島 RTF June 2024 by IPNTJ.

7. 参考文献

- [1] 山本健広, 藤原健, スプーフィング対抗技術のテスト環境構築についての検討, 第 61 回飛行機シンポジウム
- [2] RTKLIB, <http://www.rtklib.com/>
- [3] ninja-scan-light (GitHub - fenrir-naru/ninja-scan-light.)