

非 GNSS 環境での IMU センサを用いた自動航行

○白丸 雅貴 (エーピーシステム) 三輪 昌史 (徳島大学)
 荒木 寿徳 (アース・アナライザ) 西川 啓一 (i システムリサーチ)

In recent years, the increase in the number of GNSS satellites and the improved performance of their equipment, such as the launch of quasi-zenith satellites, have made it possible to accurately control the precise position of UAV. However, when it comes to areas where GNSS satellite information cannot be acquired such as the undersides of bridges, precision flight UAVs cannot be used. In this study, an IMU was used to safely fly over areas where GNSS satellites cannot be acquired, and the actual flight trajectory after GNSS satellite information is no longer available was compared with the target flight trajectory..

1. はじめに

近年、準天頂衛星の打ち上げ等で GNSS 衛星の増加や、機器の性能が向上したことにより、正確に無人航空機 (以下 UAV) の精密な位置制御ができるようになった。筆者らは精密飛行 UAV を用いて計測や点検業務などの様々な用途で使用してきた [1][2][3][4]。しかし橋梁下部のような、GNSS 衛星情報が取得できない箇所に至っては、精密飛行が出来ないのが現状である。

今回、橋梁下部のような GNSS 衛星が取得できない箇所を安全に飛行させるために IMU を使用し、GNSS 衛星情報が取得できなくなったからの実際の飛行軌跡と、目標飛行軌跡と比較した。この結果をもとに橋梁下部の自動飛行の可能性について検証する。

2. 実験装置及び方法

2-1 実験方法

非 GNSS 環境下と GNSS 環境下での実験を行うのにあたり、場所の選定が非常に難しいため、今回は飛行中に位置制御用の GNSS 信号を機械的に遮断し、強制的に非 GNSS 環境とした。また、実際の飛行軌跡を取得する為に、UAV 中央に別途飛行軌跡計測用の GNSS アンテナを配置した (IMU の 0.18m 直上)。

目標飛行軌跡は 3 種類作成した。その軌跡にそって自動飛行を行いつつ、途中で GNSS 信号を 30 秒または 40 秒間遮断し、その後 GNSS 信号を復帰させた。GNSS が遮断されてから復帰するまでの IMU 座標値と飛行軌跡計測用 GNSS の座標値を比較した。自動飛行は GNSS 信号の遮断・復帰にかかわらず継続させた。

比較として、実際の飛行軌跡と目標飛行軌跡との水平誤差と垂直誤差を、GNSS 信号遮断後 1 秒、10 秒、20 秒、30 秒の 4 ポイントで確認した。また、IMU と GNSS の取り付け高が異なるため、GNSS 遮断直前の高度差を IMU にオフセットし、高度の比較をした。これらの結果より IMU のみによる飛行精度を検討する。

2-2 GNSS 機器構成

機体の位置制御に関わる部分である、GNSS を遮断するスイッチの構成と機体制御の機器構成を図 1 に示す。飛行軌跡計測用の GNSS 構成を図 2 に示す。

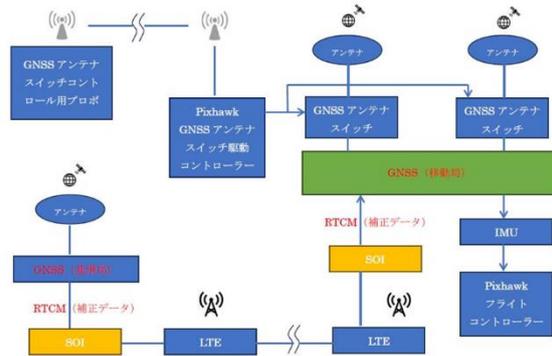


図 1 位置制御用 GNSS 構成

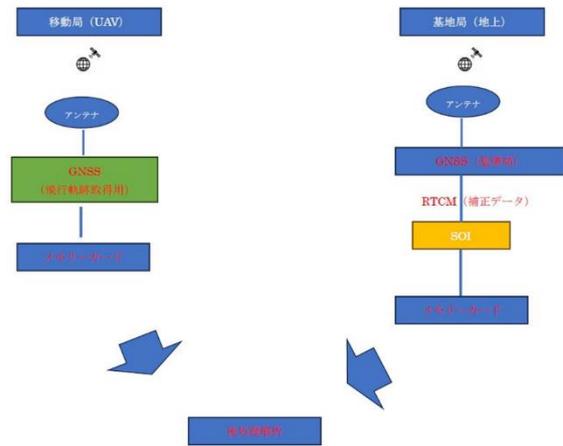


図 2 飛行軌跡計測用 GNSS 構成

2-3 実験装置

使用した機材を表 1 に示す。また、UAV 全体や、一部拡大写真を図 3 から図 5 に示す。

表 1 使用機材

機材	メーカー	型式
UAV	QUEST社	8ローターUAV
GNSS	iシステムリサーチ社	Sept-Soi
IMU	SBG社	Ekinox-E
FC		PixHawk
プロポ	双葉電子工業社	FMT-04 (機体操縦用)
		T14SG (GNSSコントロール用)



図 3 UAV 全体

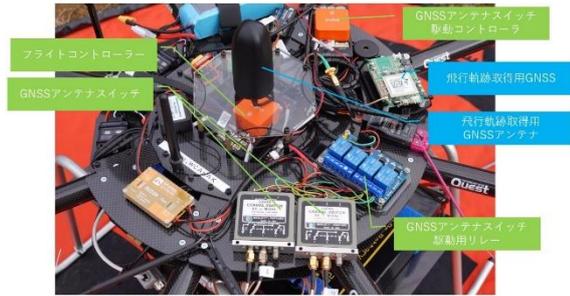


図 4 GNSS アンテナスイッチ他

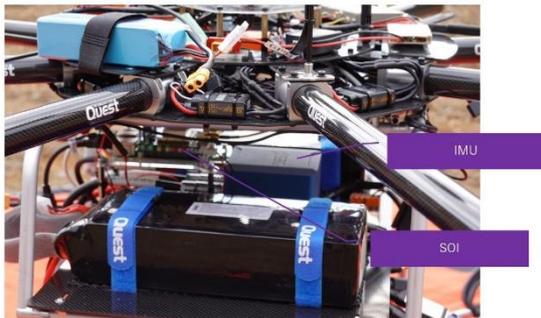


図 5 IMU および SOI

2-4 実験場所

京都府綾部市にある、綾部市総合運動公園のグラウンドを借用し実験を行った。実験箇所を図 6 に示す。

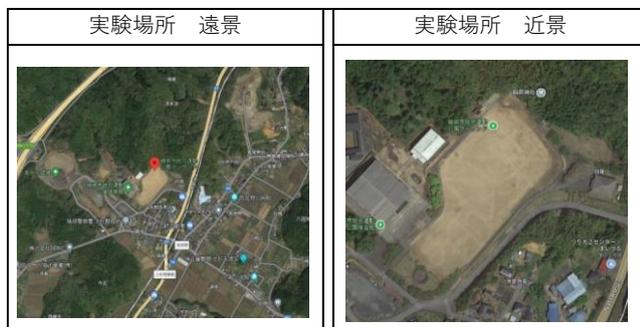


図 6 実験場所

2-5 飛行軌跡

飛行軌跡は直線コース 2 つと折れ曲がり軌跡 1 つの計 3 つの軌跡を用意した。詳細を下記に示す。

2-5-1 フライト 1

自動航行を開始後、100m の直線コースに入ってから 10 秒後に GNSS を遮断し、30 秒後に GNSS を復帰させる。直線コースの端に到達したら自動帰還させる。高度は一定（対地高度 10m）に設定した。飛行速度は、1.5m/s で行う。

フライト 1 の概要を図 7 に示す。

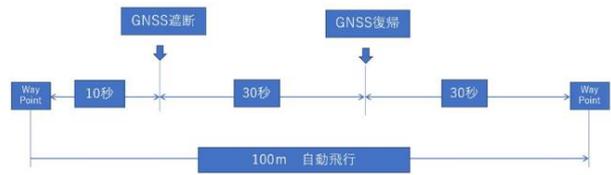


図 7 フライト 1 概要

2-5-2 フライト 2

フライト 1 と同じ軌跡で GNSS の遮断時間を 40 秒に延長する。フライト 2 の飛行概要を図 8 に示す。



図 8 フライト 2 概要

2-5-3 フライト 3

フライト 3 では、橋梁下部を飛行することを想定し他軌跡である。高度は対地高度 10m 一定とし、飛行速度は 1m/s で行う。フライト 3 の概要を図 9 に示す。

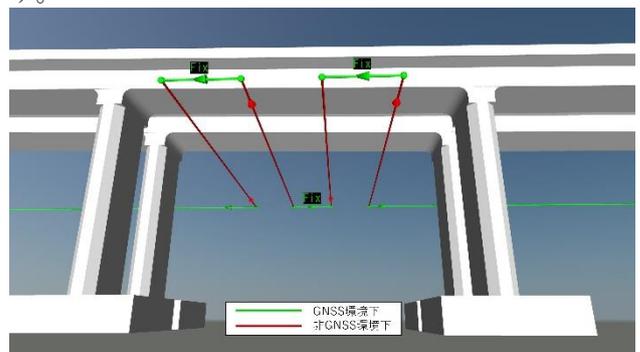


図 9 フライト 3 水平移動概要

3. 実験結果

IMU のみでの飛行精度を GNSS 遮断後の時間と目標飛行軌跡からの水平方向のズレと高さのズレで評価した。なお、各フライトを通し、GNSS 復帰操作後、機体側 GNSS が Fix するまでにさらに 10 秒程度必要なため、IMU のみで飛行している時間が飛行プランよりも長くなっている。また、IMU で計測した高度は IMU と軌跡用 GNSS アンテナの取り付け

位置の差や GNSS 誤差を考慮し、GNSS 遮断直前の差をもって調整した。

3-1 フライト 1

GNSS 遮断から復帰直前の 30 秒間の予定コースからのズレを図 10 に示す。このコースからズレは本来の設定したコースから軌跡用 GNSS で求めた実際の飛行軌跡との差より求めている。

また、IMU が計算している時刻および座標に対し、軌跡用 GNSS の同一時刻と座標の水平距離を座標水平誤差として図 10 に合わせて描いている。



図 10 IMU のみによる飛行の位置誤差 (FLT1)

図 11 に同一時刻の IMU 計算値と軌跡用 GNSS の位置を示す。赤点 (大きな点) がある時刻の IMU が計算した位置を示す。また、青点 (小さな点) は軌跡用 GNSS による同一時刻の位置を示す。GNSS 遮断後 1 秒程度では両者はほぼ同一位置を示しているが、10 秒、20 秒と経つに従って徐々に離れる。座標水平誤差とはこの両点の水平距離を示している。

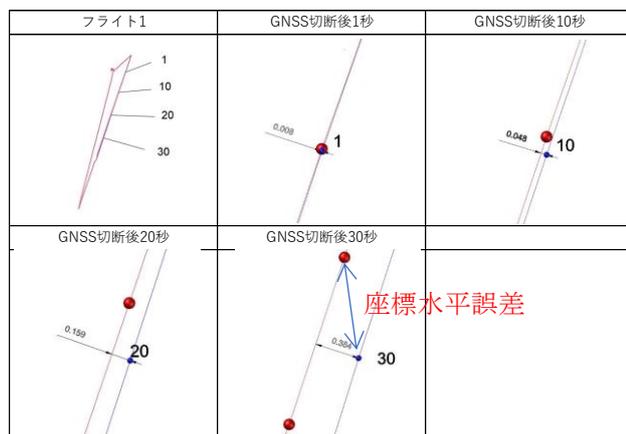


図 11 同一時刻の IMU と軌跡用 GNSS の位置

フライト 1 でのコースとの差は GNSS 遮断 30 秒後において、0.384m であった。垂直誤差の変化幅は +0.019m、-0.012m であった。また、その時の座標水平誤差は 0.868m であった。

3-2 フライト 2

フライト 2 では、再度同じコースを飛行する。フ

ライト 1 と同様に GNSS を遮断してから復帰直前の 40 秒間の予定コースからのズレおよび座標水平誤差の時間変化を図 12 に示す。



図 12 IMU のみによる飛行の位置誤差 (FLT2)

フライト 2 でのコースとの差は GNSS 遮断 30 秒後において、0.321m であった。垂直誤差の変化幅は +0.012m、-0.012m であった。また、その時の座標水平誤差は 0.868m であった。また、GNSS 遮断 40 秒後においては、0.776m であった。垂直誤差の変化幅は +0.014m、-0.012m であった。また、その時の座標水平誤差は 0.797m であった。

3-3 フライト 3

橋梁の下部の点検の場合、橋梁の上流側または下流側の GNSS が受信できる環境で一旦待機する。その後、橋梁の下を通る高さまで下降し、そのまま橋梁の下部を通過する。橋梁下を通過している間は GNSS が受信できない状態となる。反対側に到達すると、GNSS が受信できるようになる。その状態で少し待機し、その後平行移動したコースを戻す。

フライト 3 では、そのイメージを想定したコースとし、橋梁下を 2 往復した。

片道を 1 コースとし、計 4 コースとしてコースからの水平誤差、高さ方向の誤差と座標水平誤差について評価を行った。

各誤差の時間変化を図 13 から図 16 に示す。

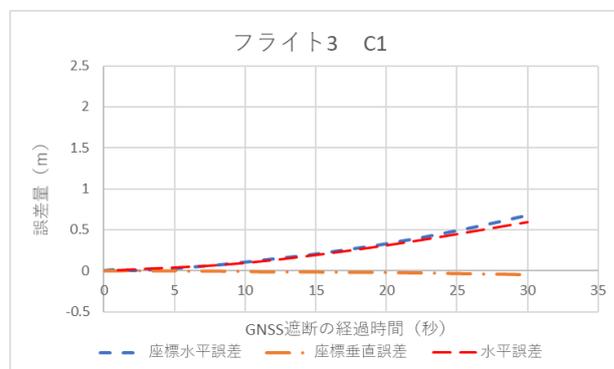


図 13 IMU のみによる飛行の位置誤差 (FLT3-C1)

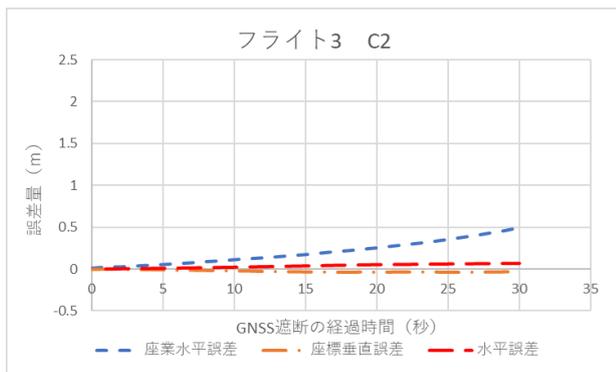


図 14 IMU のみによる飛行の位置誤差 (FLT3-C2)

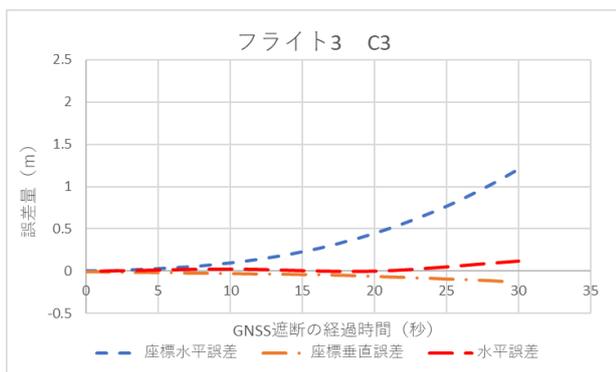


図 15 IMU のみによる飛行の位置誤差 (FLT3-C3)

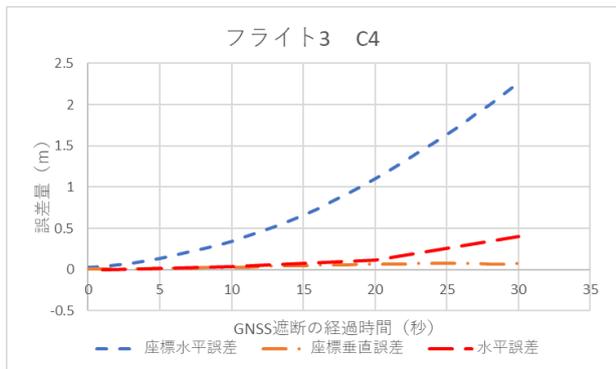


図 16 IMU のみによる飛行の位置誤差 (FLT3-C4)

コースの水平誤差は、C1:0.592m C2:0.065m C3:0.123m C4:0.400mであった。

また高さ方向は、C1:+0.005m,-0.052m で、C2:-0.036m で、C3: +0.123m で、C4:+0.075 でC2,C3C4は片方向のみの誤差であった。

座標水平位置の誤差は C1:0.677mC2:0.495m C3:1.203m C4:2.265m となった。

4. 考察・まとめ

今回の実験より下記の事が判った

- GNSS 遮断後 15 秒まではコース誤差が 0.200m 以下である。

- GNSS 遮断後 30 秒の非 GNSS 環境下であれば最大で水平が 0.592m、垂直が 0.123m である。
- 座標水平誤差は GNSS 遮断より徐々に増加し、30 秒で最大 2.263m、40 秒で 0.797m であった。

以上の結果により、本 IMU を利用した UAV は橋梁の下を通過する目的としては速度 1m/sec で約 30 秒であれば設定コースとの誤差は 1m 以下にとどまることが判った。橋梁幅 30m が飛行できるのであれば、一般の道路橋では十分対応できる。

速度を上げることでより幅の広い橋梁に対応できそうであるが、さらに実験を継続して確認したい。

一方、座標水平誤差については、二つの原因が考えられる。一つは速度推定誤差である。もう一つは時計の誤差による影響が考えられる。IMU の時計は GNSS に同期している。GNSS が受信できている間は GNSS 時計の精度が十分保たれる。しかしながら、GNSS 信号を遮断することにより時計が狂い始める。軌跡用 GNSS は GNSS 信号を継続して受信しているため、時計が狂うことはないが、IMU については時計が自走となる。この時計のズレが座標の誤差または飛行速度の誤差として現れた可能性もある。

今回の実験を通してある程度の実用性がみえたので、今後、や上下移動を含む様々なコースやより長い時間の GNSS 遮断などの評価を行っていく予定である。

参考文献

- [1] 西川啓一他, 「小型 2 周波数 GNSS による精密飛行の検討」, 第 38 回日本ロボット学会学術講演会, RSJ2020AC1K3-06 (2020 年)
- [2] 西川啓一 三輪昌史 荒木寿徳. (2019 年 12 月). 高精度自動離着陸・飛行ドローン. 検査技術, P27-32, 日本工業出版.
- [3] 西川啓一 萩原育夫, 「精密自動飛行ドローンによる定期的な斜面の変位・変形計測」, 第 2 回 JDC フォーラム, (2020 年 11 月)
- [4] 三輪昌史, 「RTK-GPS を用いた精密飛行マルチコプタによる収穫びわの運搬実験」, 第 38 回日本ロボット学会学術講演会, RSJ2020AC1K2-03 (2020 年)