

固定翼無人機の広域位置探知実験の結果について

監視通信領域 ※古賀 穎
航空交通管理領域 虎谷 大地, 佐藤 岳

1 まえがき

島国である我が国は広大な海域や沿岸域を有しております。これらの領域には多くの施設や設備が存在する。無人機を利用することで、広い領域をリアルタイムで監視・観測することが可能になる。これを実現するためには無人機を目視外で自動運航することが必要であり、このためには無人機の動態管理や有人機との協調的な空域利用や周辺状況への適応が求められる。

当所では、将来における自動運航を実現するため、無人機の動態を管理する技術（動態管理技術）、有人機との協調的な空域利用および周辺状況に適応した運航技術（協調技術）などの技術の開発を令和4年から3か年の計画で開始した。

令和4、5年にはシステムの一構成要素である無人機の広域における動態管理を行う実験システムを開発し、飛行実験を行った。本稿では実験の概要と実験結果については報告する。

本稿の構成は以下のようになる。2章にて実験システムの概要について述べた後、3章でシステムの性能解析の結果について述べ、4章でまとめを述べる。

2. 実験システム

無人機の動態を管理するためには、その位置と識別（ID）情報が必要となる。2022年6月より無人機へのリモートID(RID)搭載が義務化[1]され、ここでは通信媒体としてBluetooth、WiFiなどが定められている。本実験ではBluetoothによるRIDを使用した実験システムを構築した。図1に実験システムの構成を示す。

RID送信機

RID送信機は無人機に搭載され、無人機の位置やIDなどを含むRIDメッセージを周期的に送信する。実験ではイームズロボティクス社製

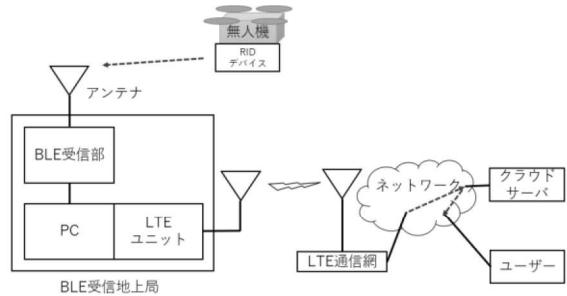


図1 実験システムの構成

の「EAMS REMOTE ID（リモートID機器）」を使用した。表1にリモートID送信機の諸元を示す。Bluetoothは伝送距離が短く、広い範囲をどのようにカバーするかが課題となる。RIDではBluetooth Low Energy (BLE) 5 Long Range (coded phy S=8) を採用している。LongRangeは伝送速度が 125kbps と標準の 1/8 の速度となる一方、誤り訂正能力の強化等より標準の約4倍の距離伝送を可能としている。

地上受信局

地上受信局 (GS: Ground Station) は RID メッセージを受信し、クラウドサーバに配信する。GSは RID受信部とメッセージ送信部から構成される。

RID受信部は RID送信機が送信する RIDメッセージを受信する。RID受信部には BLE評価ボード(Nordic nRF52840-DK)を使用した。本ボードは外付けアンテナを取り付けることが可能である。GS1~5は2つのボードを搭載し、

表1. リモートID送信機の諸元[2]

無線仕様	Bluetooth5.0, 出力10mW, 送信周期約0.9秒
サイズ	W60mm × H30mm × D22mm
本体重量	33g
稼働時間	8時間以上
センサ	GNSS, 気圧センサ内蔵

表2. アンテナの概要

地上局番号	種別
1	コリニアアンテナ(9dBi) パッチアンテナ (14dBi)
2-5	コリニアアンテナ(9dBi) パッチアンテナ (13dBi)
6	八木 (13dBi)

2つのアンテナ（無指向および指向性）を持つ。GS6は1つのボードを搭載し、1つの指向性アンテナを有する。表2にアンテナの概要を示す。

メッセージ送信部は RID メッセージを MQTT(Message Queuing Telemetry Transport)メッセージングプロトコルによりクラウドサーバに送信（パブリッシュ）する。クラウドサーバはサブスクライブしたユーザにRIDメッセージを配信する。

実験では南相馬の海沿いの6か所に地上受信局を約1.5kmから2km間隔で配置した。図3に+印で飛行全体航跡と地上受信局の位置を示す。

固定翼無人機

本実験では海上から離発着が可能な飛行艇型



図2. 固定翼無人機の外観

表3. 固定翼無人機の諸元[3]

全長×翼幅	1960mm×3100mm
離陸重量	19kg
航続時間	120分
巡航速度	65km/h
動力	電動モータ
装備	EO・IR センサ搭載

の固定翼無人機（Space Entertainment Laboratory社 Hamadori3000）を使用した。表3に固定翼無人機の諸元を示す。飛行範囲は、南北約7km、東西約0.5km、高度40m以上150m未満とした。1フライトの飛行時間は約45分で飛行距離は約45kmであった。飛行後は海上に着水、機体を回収しバッテリ交換、再度フライトを実施した。1日で3回のフライトを実施した。

3. 性能解析

本章では単独地上局とシステム全体の性能解析の結果について述べる。

3.1 単独地上局

単独地上局では、探知距離および受信信号強度（RSSI: Received signal strength）の解析結果について述べた後、位置情報の更新確率(PU: Probability of Update)の算出結果を示す。

GS3は飛行経路の中間に位置しており、南北と東の見通しがよい。地上局3は無指向性のコリニアアンテナと指向性のパッチアンテナのを有する。パッチアンテナは東方向を向いている。図4に無指向性アンテナ、図5に指向性アンテナによる受信データ位置とRSSI分布を示す。アンテナパターンに即した分布となっている。

探知距離

図6に無指向性アンテナ、図7に指向性アンテナの距離による受信状況を示す。点のプロットは RID メッセージを受信した位置である。1000m以下では受信確率が高い。最大距離は無指向性で約4000mからのメッセージを受信している。1000~4000mでは連続的に受信できる時間と長い欠落が発生する時間が混在しており、今後の分析が必要である。実験では GS3 の沖1500m付近で3回離着水している。このため1500m付近に距離変化が少ない時間帯がある。

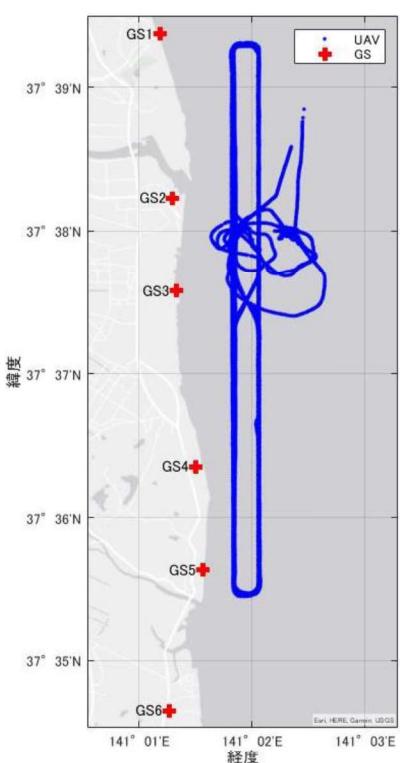


図3. 飛行航跡とGS配置

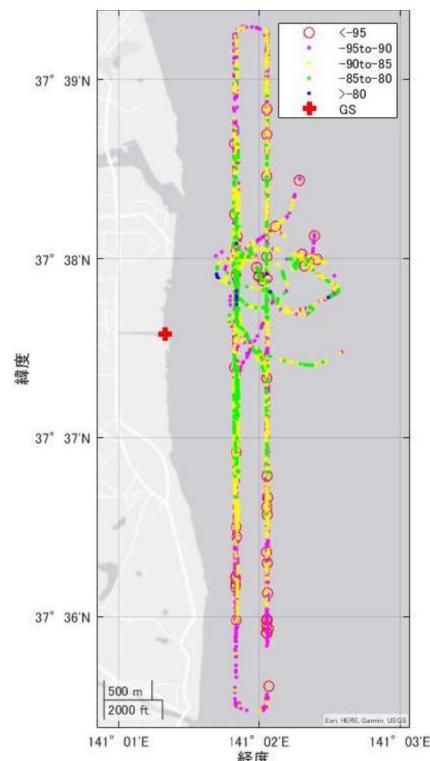


図4. GS3の受信状況（無指向）

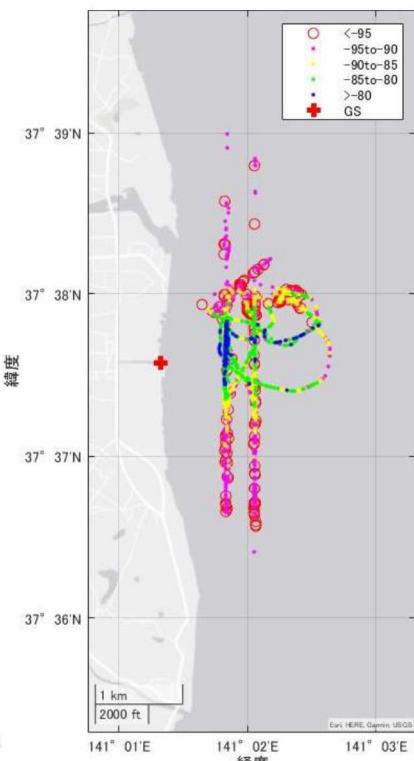


図5. GS3の受信状況（指向性）

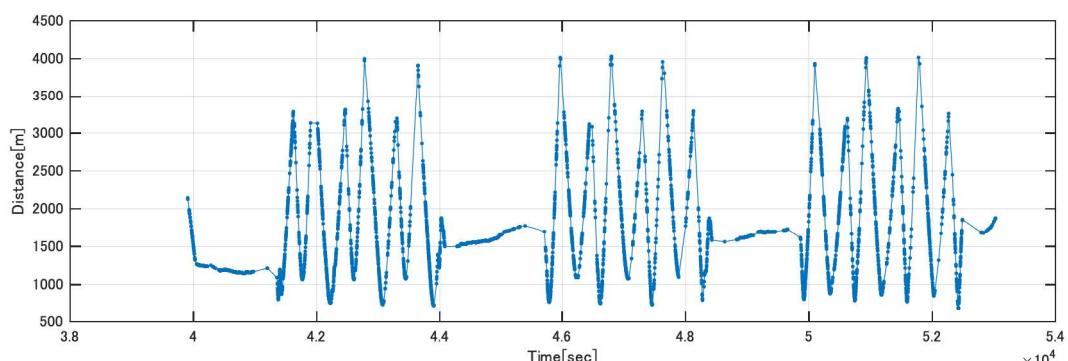


図6.無指向性アンテナによる受信状況（時間一距離）

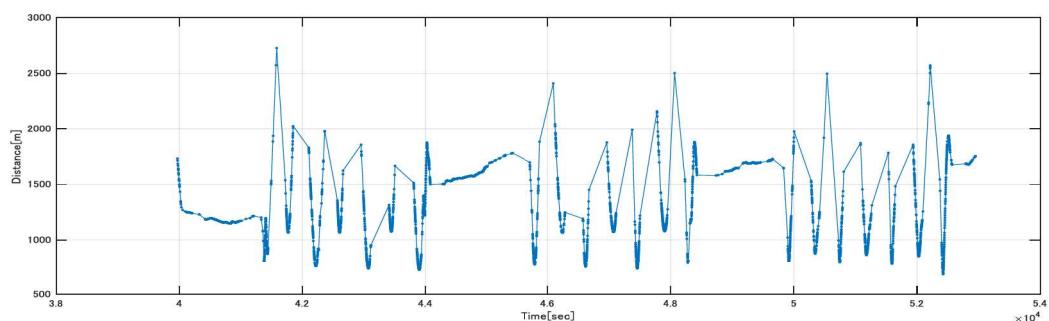


図7.指向性アンテナによる受信状況（時間一距離）

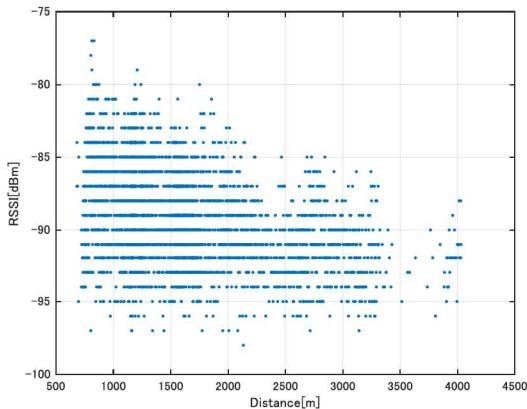


図 8. RSSI 分布(無指向性)

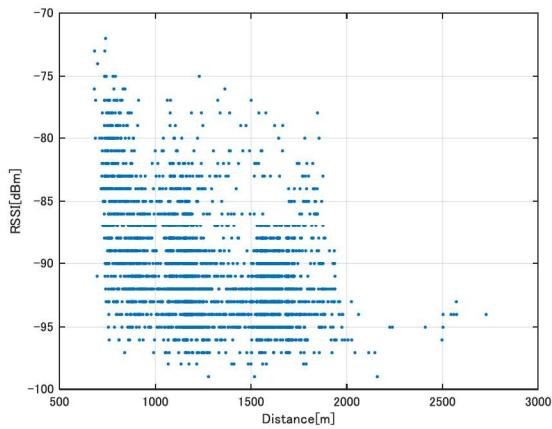


図 9. RSSI 分布(指向性)

RSSI

RSSI は RF52480 ボードが output する値を解析した。（※測定有効範囲[4]は-90～-20dBm とあり、-90dBm 以下は参考値となる。）図 8 と図 9 に距離による RSSI の分布を示す。RSSI は無指向性で -80～-95dBm の間、指向性で -75～-95dBm の間に集中しており、遠方ほど強度が低くなることがわかる。

表4. ターミナル 3NM 中密度の要求値[5]

データ更新率(PU)	97.5%
データ更新間隔(UI)	5 秒
必要データ数	246 点以上
必要飛行時間	1230 秒以上

表 5. GS3 (無指向性) の PU 値

フライト	飛行時間 T(Sec)	欠落時間 M(Sec)	PU[%] (1-M/T)
# 1	2492	604	75.8
# 2	2523	875	65.3
# 3	2466	771	68.7
Total	7481	2250	69.9

表 6.GS3 (指向性) の PU 値

フライト	飛行時間 T(Sec)	欠落時間 M(Sec)	PU[%] (1-M/T)
# 1	1003	157	84.3
# 2	1090	232	78.7
# 3	954	202	78.8
Total	3047	591	80.6

PU

飛行航跡について位置情報の更新率を算出した。算出方法としては 1090MHz 拡張スキッタ地上局の欧州規格[5]を参考とした。本規格では空域と空域密度で区別して基準値が設定されている。無人機の監視において必要とされる基準値については今後議論が必要であるが、ここではターミナル 3NM 中密度の基準値を適用した（表 4 参照）。表 5 に無指向性アンテナによる結果、表 6 に指向性アンテナによる結果を示す。無指向性アンテナの PU はフライト毎で 65～75% であり、全航跡では約 70% であった。指向性アンテナの PU は無指向性より若干高く 78～84%，全航跡では約 80% であった。

地上局単独では飛行エリア全体を 5 秒更新率・95%以上を確保することは難しいことがわかる。

3.2 システム全体

ここではシステム全体の性能として、6 つの GS/11 個のアンテナによる統合データによる PU を算出した。表 7 に結果を示す。更新率は全てのフライトで 99% 以上なり、全航跡で 99.89% となっていた。複数の GS が相互に補完することで連続的に RID メッセージを受信でき

表7.システム全体のPU値

フライト	飛行時間 T(Sec)	欠落時間 M(Sec)	PU[%] (1-M/T)
# 1	2749	8	99.70
# 2	2717	0	100.00
# 3	2738	1	99.96
Total	8204	9	99.89

ており、システム全体により南相馬沖の南北7km、東西0.5kmの広い領域を飛行する無人機を位置情報の5秒更新率95%以上でリアルタイム監視できることを確認した。

4.まとめ

当所では、海上における自動運航を実現するため、これを実現する要素技術の開発をしている。その一つとして、無人機の動態を広域管理する実験システムを構築し、飛行実験により性能を解析した。

その結果、実験システムは、南北7km、東西0.5km、高度の150m未満の領域を5秒更新率(PU)99%以上で監視できることを確認した。一方、地上受信局だけでは、高いPUを得ることが難しいことが分かった。

Bluetoothによる広域管理システム今後の課題としては、長時間欠落の分析、地上局の最適配置、信号環境による影響、長時間欠落の分析RIDデバイスの違いによる影響などがあげられる。単独地上局では長時間の欠落が観測されており、これらの要因を明らかにしたい。また、より広い領域を監視するためには、多くの地上局が必要になるがコストも増大する。アンテナと配置の最適な組み合わせなどを検討したい。さらに、信号環境による性能の違いが課題としてあげられる。本実験では電波環境調査は行っていないが、飛行範囲が海上であることから、都市部や住宅地などと比べて良好な電波環境で

あることが予想される。RIDは2.4GHzのISMバンドを使用していることから、その受信性能は電波干渉（電波環境）の影響を受ける。同じ周波数の電波を発信する機器の存在の有無により性能が変化する。

この他に、無人機の海上における自動運航を支援するため、協調技術についても検討を行う。有人機との空域協調を実現技術として、当所が有する低高度空域を監視可能な有人機監視システム[6]と無人機の動態管理システムを連接して自動運航支援する統合システムや関連技術の開発を目指す。

参考文献

- [1] リモートID技術規格書、国土交通省航空局、令和4年（2022年）11月、
<https://www.mlit.go.jp/koku/content/001444589.pdf>
- [2] イームズロボティクス，“リモートID送信機 ユーザーマニュアル”，
<https://www.eams-robo.co.jp/download/>
- [3] スペースエンターテイメントラボ社 HP,
<https://www.selab.jp/products/hamadori3000/>
- [4] NORDIC, "nRF52840 Product Specification v1.1",
https://infocenter.nordicsemi.com/pdf/nRF52840_PS_v1.1.pdf
- [5] EUOCAC, "Technical specification for a 1090MHz extended squitter ADS-B ground system", ED-129B, Mar 2016
- [6] 古賀 祯, “マルチラテレーション技術を用いた有人機の位置探知システムの開発について”, 第60回飛行機シンポジウム, 2022年10月