

# 無人航空機の衝突回避技術

## Collision Avoidance Technology for Unmanned Aerial Vehicle

平木直哉 板倉晃  
Naoya Hiraki Akira Itakura

### 要旨

無人航空機は、様々な用途への利活用が期待され、運用数も増加している。一方、安全な利活用のためにはドクターヘリなどの有人航空機との衝突回避技術の実現は喫緊の課題である。このような背景のもと、当社は国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下NEDO）の委託、助成により、民間企業各社と共に非協調衝突回避システムを開発した。本システムをシングルロータの中型無人航空機に搭載し、衝突回避システムによる自律的な衝突回避試験を世界で初めて実施し、有人ヘリコプタに対して相対速度100 km/hでの衝突回避に成功した。さらに、小型無人航空機に搭載することを考慮し、センサの小型・軽量化および低消費電力化の研究開発を行い、相対速度200 km/hでの衝突回避を成功させた。

### Abstract

Unmanned aerial vehicles are expected to be utilized for various purposes, and the number of operations is increasing. On the other hand, the realization of collision avoidance technology with manned aerial vehicles such as helicopter ambulances is an urgent issue for safe utilization. Against this background, JRC has developed a non-cooperative collision avoidance system in cooperation with private companies, commissioned and subsidized by the New Energy and Industrial Technology Development Organization (hereafter NEDO), a National Research and Development Agency. We installed this system on a single-rotor medium-sized unmanned aerial vehicle, have conducted the world's first autonomous collision avoidance test using the collision avoidance system, and have successfully avoided a collision with a manned helicopter at a relative speed of 100 km/h. Furthermore, we have conducted research and development to reduce the size, weight, and power consumption of the sensor in consideration of mounting it on a small-sized unmanned aerial vehicle, and have successfully avoided a collision at a relative speed of 200 km/h.

### 1. まえがき

ドローンや空飛ぶクルマといった次世代空モビリティの誕生で、空の利活用の可能性が広がっている。一般にドローンと呼ばれる小型の無人航空機や、それよりも一回り大きな中型の無人航空機は、既に農業分野などで利用が広がり、さらには災害時の物資運搬や遭難者捜索、物流インフラなどの用途が大いに期待され、運用数は増加している。しかし、これらの無人航空機とドクターヘリなどの有人航空機のニアミス事例<sup>\*1</sup>が国内で報告されるなど、衝突回避技術の実現は、安全な利活用のための喫緊の課題となっている。また、衝突回避技術は、無人航空機の実用化に必要とされる「目視外飛行<sup>\*2</sup>」および「第三者上空飛行<sup>\*3</sup>」の実現に欠かせない技術である。

無人航空機が地上および空中の物件などを検知し、即時に当該物件との衝突を回避し飛行するための技術（いわゆるSense And Avoid (SAA)に関する技術）のうち、地上からの支援に頼らず、衝突対象との連携を必要としない方式を非協調式のSAAという。非協調式SAAは無人航空機に搭載された各種センサ（レーダ、光学カメラなど）からの情報を基に、飛行の妨げとなる物件などの位置などを特定し、無人航空機自らが最適な飛行経路を生成し、衝突を回避する技術である。

本技術を実現するために、比較的遠距離（数km先）において有人ヘリコプタの探知を可能とするセンサが重要であ

り、当社は無人航空機に搭載可能な電波センサ（レーダ）の開発、実証実験、センサの小型・軽量化および低消費電力化に取り組んでいる。

本稿では、これらの成果について述べる。

### 2. 衝突回避技術の開発概要

当社は、NEDOの「ロボット・ドローンが活躍する省エネルギー社会の実現プロジェクト」（以下、DRESSプロジェクト）に参画し、2017年度から2019年度にかけてNEDOの助成、委託により株式会社SUBARU、日本アビオニクス株式会社、株式会社自律制御システム研究所、三菱電機株式会社と共に衝突回避技術の開発を行った。

無人航空機が衝突を回避するためには、無人航空機自らが有人航空機を確実に認識し回避行動をとる非協調式のSAAの実現が不可欠である。SAAを実現するためには、電波センサ（レーダ）と光波センサ（カメラ）を統合した「衝突回避システム」の開発が必須である。

当社は、100 kgクラスの中型無人航空機搭載用電波センサ（レーダ）を開発し、シングルロータの中型無人航空機に搭載可能なセンサを実現した。

本センサを搭載した中型無人航空機によって衝突回避試験を実施し、当社が開発した電波センサ（レーダ）により相対速度100 km/h で対向する有人ヘリコプタを適切に探知し、衝突回避に成功した。

さらに、10 kgクラスの小型無人航空機に搭載することを考慮し、センサの小型・軽量化および低消費電力化の研究開発ならびに同センサを搭載した小型無人航空機による衝突回避試験をNEDOの助成、委託により実施した。試験は、株式会社SUBARU、日本アビオニクス株式会社、株式会社自律制御システム研究所、マゼランシステムズジャパン株式会社とともに実施し、当社が開発した電波センサ（レーダ）をはじめとする各種センサを搭載した小型無人航空機が相対速度200 km/h で対向する有人ヘリコプタを適切に探知し、衝突を回避することを実証した。

### 3. 中型無人航空機用電波センサ（レーダ）の概要

当社が開発を担当した電波センサ（レーダ）を搭載した中型無人航空機の姿を図1に示す。



図1 センサを搭載した中型無人航空機

Fig.1 Medium-sized unmanned aerial vehicle mounted a sensor

当社が開発した中型無人航空機用電波センサ（レーダ）の外観を図2に、内部構造を図3に示す<sup>(1)</sup>。電波センサ（レーダ）は、容積30,000 cm<sup>3</sup>、質量5 kg、消費電力70 Wで、回転方式のアンテナにより水平方向360度の搜索が可能であり、設計計算上、5 km程度離れた位置を飛行する有人ヘリコプタの探知が可能である。



図2 中型無人航空機用電波センサ（レーダ）の外観

Fig.2 Appearance of the radio wave sensor (radar) for medium-sized unmanned aerial vehicles

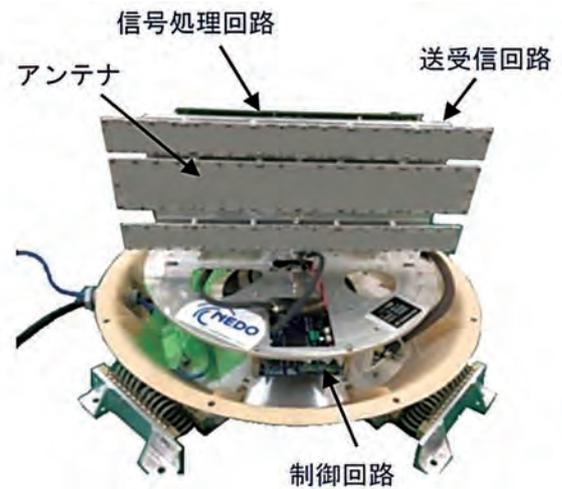


図3 電波センサ（レーダ）の内部構造

Fig.3 Internal structure of the radio wave sensor (radar)

### 4. 中型無人航空機による衝突回避試験の実施

2019年7月に、福島県、南相馬市、公益財団法人福島イノベーションコースト構想推進機構の協力のもと、福島浜通りロボット実証区域 広域飛行空域（福島県南相馬市）において、中型無人航空機に搭載した衝突回避システムによる自律的な衝突回避試験を世界で初めて実施した。

衝突回避試験では、60 km/h程度で飛行する有人ヘリコプタに対し、衝突回避システムを搭載した無人航空機が向かい合う方向で規定された経路を40 km/h程度で直進飛行する。有人ヘリコプタが接近した段階で、無人航空機に搭載した電波センサ（レーダ）および光波センサ（カメラ）で有人ヘリコプタを探知・識別し、自律管理装置が衝突の危険性を自動的に判断し、規定された経路を外れて回避行動をとる。

衝突回避の流れを図4に示す。

#### ① 電波センサ（レーダ）で探知

電波センサ（レーダ）で、遠距離（5 km程度）の飛行物体を早期に探知する。

#### ② 識別、旋回開始

電波センサ（レーダ）で探知した飛行物体が500 m の距離まで接近した段階で、光波センサ（カメラ）の画像処理により、飛行物体が有人ヘリコプタであることを識別。さらに、電波センサ（レーダ）の情報から有人ヘリコプタの飛行速度、方向などを算出し、このまま規定の経路を直進すると衝突の危険性があることを自動的に判断、衝突回避経路を新たに生成し、旋回を開始。

#### ③ 最接近

最低安全離隔距離を保てるよう衝突回避経路上を飛行。

#### ④ 復帰開始

衝突回避行動を終了し、規定の経路への復帰を開始。

#### ⑤ 復帰完了

衝突回避経路の飛行を完了し、規定の経路への復帰を完了。

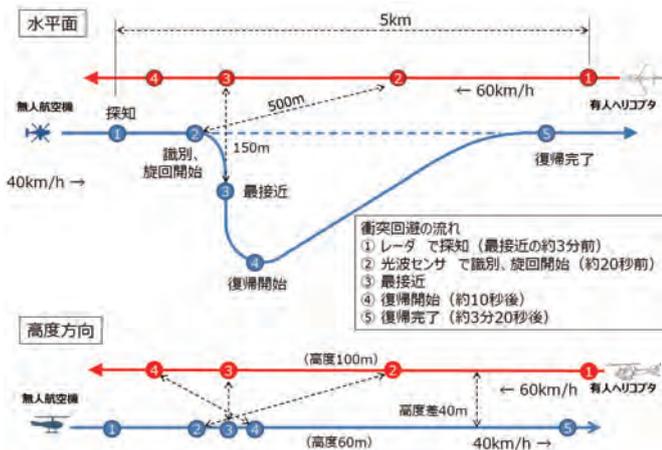


図4 衝突回避試験の流れ

Fig.4 Flow of the collision avoidance test

以上の試験により、中型の無人航空機に搭載した当社製の電波センサ（レーダ）を含む各種センサが適切に有人ヘリコプタを探知・識別し、自律的に衝突回避を行う技術を実証した。

図5は、当該試験において、衝突脅威である有人ヘリコプタを電波センサ（レーダ）で探知している状況の例である<sup>(2)</sup>。

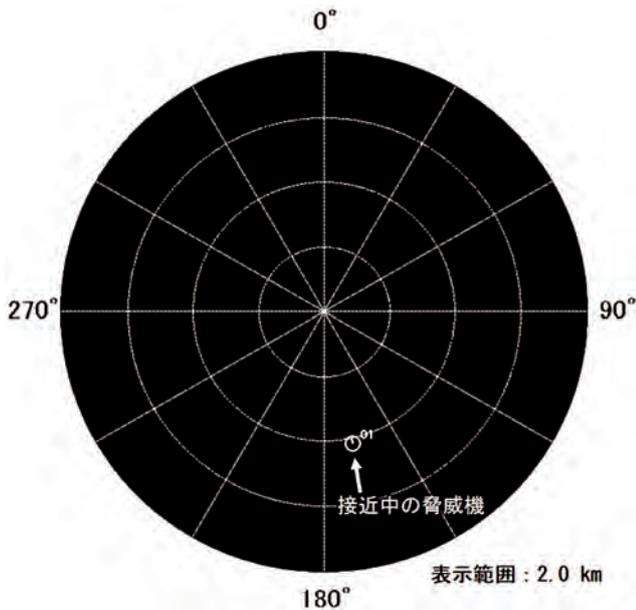


図5 有人ヘリコプタ（脅威機）の探知状況の例

Fig.5 Example of the detection status of a manned helicopter (threat aerial vehicle)

### 5. センサの小型・軽量化および低消費電力化

2020年度からセンサの小型・軽量化および低消費電力化の研究開発をNEDOの助成により開始した。電波のビーム走査をアンテナの機械的な回転によらない電子走査方式と置き換えることで、回転機構をなくし、容積は1/10以下となる2,400 cm<sup>3</sup>、質量1.2 kg、消費電力40 Wを実現した。開発した電波センサ（レーダ）を図6に示す。また本センサを10 kgクラスの機体に搭載した様子を図7に示す<sup>(3)</sup>。

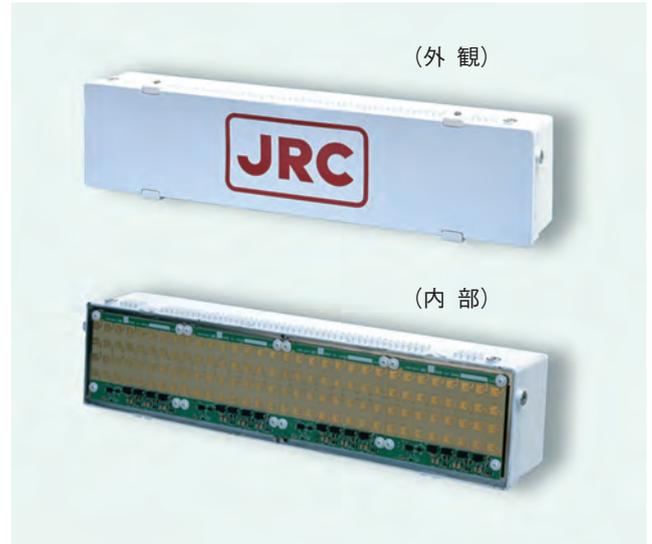


図6 開発した電波センサ（レーダ）

Fig.6 Developed radio wave sensor (radar)



図7 小型化・低消費電力化した電波センサ（レーダ）を搭載した小型無人航空機

Fig.7 Small-sized unmanned aerial vehicle mounted a radio wave sensor (radar) that reduced the size and power consumption

衝突回避の実証試験を行うに先立ち、小型無人航空機に電波センサを搭載し、地上とのアップリンク／ダウンリンクを通じて電波センサ（レーダ）に指令・制御を行い、基礎データを取得できること、すなわち受信信号データを電波センサ内へ蓄積しログデータが取得できることを長野市滑空場において確認した。動作試験の様子を図8に示す。飛行状態で取得した電波センサ（レーダ）のログデータを図9に、また同時刻に光波センサ（カメラ）が捉えた映像を図10に示す。電波センサ（レーダ）のログデータに基づき電子的に方位方向走査が行われ、光波センサ（カメラ）が捉えた映像で確認できる橋などの構造物や地形からの反射と考えられる受信信号データが記録されていることを確認した<sup>(3)</sup>。



図8 小型無人航空機に電波センサ（レーダ）を搭載した動作試験の様子

Fig.8 View of the operation test of a small-sized unmanned aerial vehicle mounted a radio wave sensor (radar)

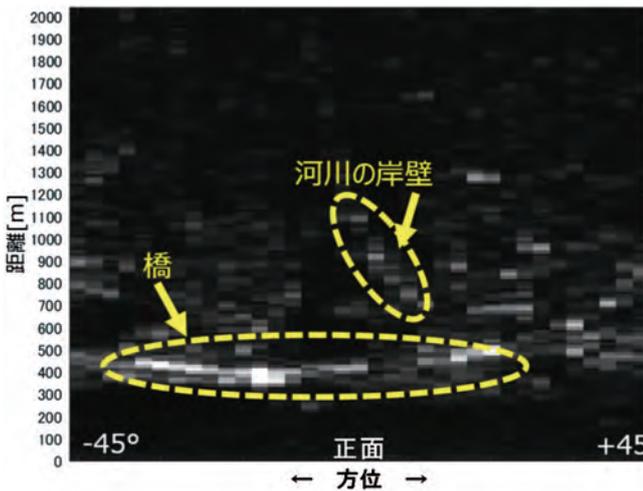


図9 電波センサ（レーダ）のログデータ

Fig.9 Log data of the radio wave sensor (radar)

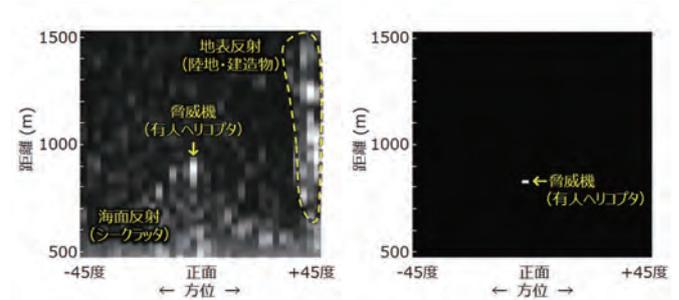


図10 電波センサ（レーダ）のログデータ（図9）取得と同時に光波センサ（カメラ）が捉えた映像

Fig.10 Image captured by the optical sensor (camera) at the same time as the acquisition of the log data (Fig. 9) of the radio wave sensor (radar)

続いて、海上において有人ヘリコプタを飛行させ、小型無人航空機に搭載した電波センサ（レーダ）でレーダ受信信号などの基礎データを取得した。得られた基礎データを用いて、脅威の対象である有人ヘリコプタを確実に探知するための信号処理に関して検討を行った。

取得したレーダの受信信号データおよびこの受信信号に対してオフラインで信号処理を行い、その効果を検証した結果を図11に示す。



(a) レーダ受信信号データ (b) 信号処理結果  
(a) Radar received signal data (b) Signal processing result data

図11 小型無人航空機に搭載した電波センサ（レーダ）で海上を飛行させた有人ヘリコプタのデータを取得した例

Fig.11 Example of acquired data on a manned helicopter flew over the sea using a radio wave sensor (radar) mounted on a small-sized unmanned aerial vehicle

レーダの受信信号データには、脅威の対象（探知目標）である有人ヘリコプタからの反射信号のほかにも、海面の波、地表および地上建造物からの様々な反射信号が含まれていることが図11(a)に示されている。以上に述べた様々な受信信号データに基づいて脅威対象である有人ヘリコプタの特徴を抽出する信号処理を行う。オフラインで信号処理を検証した結果、図11(b)に示されるとおり有人ヘリコプタが適切に探知できることを確認した。

オフラインで検証された信号処理アルゴリズムを電波センサ（レーダ）へ組み込み、次項に述べる衝突回避試験を実施した。

## 6. 小型無人航空機による衝突回避試験の実施

2020年9月9日から10日にかけて、広域飛行空域（福島県南相馬市）において、小型化／低消費電力化されたセンサを10 kgクラスの小型無人航空機に搭載し、自律的な衝突回避試験を実運用速度域である相対速度200 km/hで実施し、世界で初めて成功した。衝突回避飛行試験の概要を図12に示す。

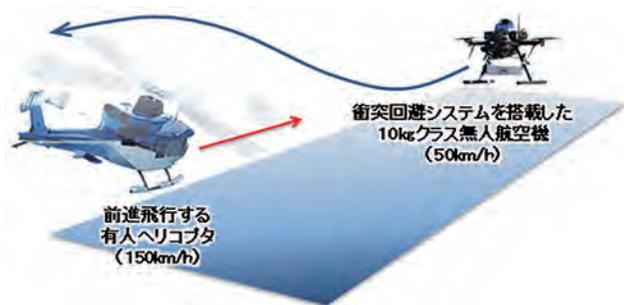


図12 衝突回避飛行試験の概要

Fig.12 Overview of the collision avoidance flight test

10 kgクラスの無人航空機と有人ヘリコプタを、相対速度200 km/h（無人航空機：50 km/h，有人ヘリコプタ：150 km/h）で各々の正面方向から接近させ、無人航空機に搭載した各種センサの探知データに基づき、衝突を回避する経路をリアルタイムで生成し、この回避経路に沿って無人航空機が自律回避飛行することを確認した。さらに、有人ヘリコプタを回避した後、無人航空機が元の飛行経路に復帰することを確認した。

電波センサ（レーダ）による有人ヘリコプタの探知状況を図13に示す。

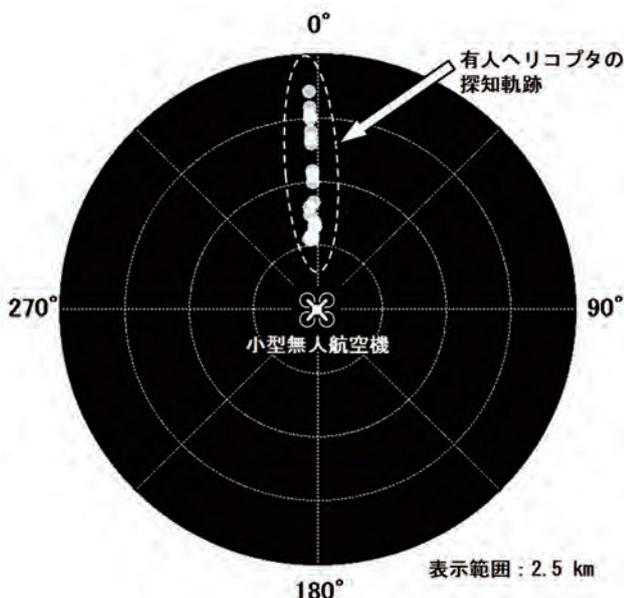


図13 電波センサ（レーダ）による有人ヘリコプタの探知状況

Fig.13 Detection status of the manned helicopter by radio wave sensor (radar)

## 7. あとがき

衝突回避技術は、無人航空機の更なる利活用および有人航空機との調和において非常に重要である。本技術の開発により、100 kgクラスのシングルロータ中型無人航空機において、有人ヘリコプタに対し相対速度100 km/hでの衝突

回避に世界で初めて成功した<sup>(4)</sup>。また、小型・軽量化および低消費電力化されたセンサを開発し、これを搭載した10 kgクラスの小型無人航空機による自律的な衝突回避試験を相対速度200 km/hで実施し、世界で初めて成功した。

なお、この成果は、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務の結果得られたものである。

### ※1 有人航空機のニアミス案件の実例

「航空機と無人航空機，無人航空機同士の衝突回避策などについて（国土交通省航空局，2016年11月8日）」の p16 参照。

### ※2 目視外飛行

無人航空機の操縦者が自分の目によって無人航空機の位置や姿勢および航行の安全性を確認できない飛行のこと。長距離の物流やインフラ点検には必須であるが、実現には操縦者の目視に代わる安全措置の実施や、衝突回避技術の実装などが必要。

### ※3 第三者上空飛行

無人航空機の運航に関与しない第三者の上空を飛行すること。市街地などで物流を実施する場合などに必須だが、実現には高い安全性や信頼性を確立する必要がある。

## 参考文献

- (1) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 ロボット・AI部、「ロボット・ドローンが活躍する省エネルギー社会の実現プロジェクト」事業原簿【公開】，研究評価委員会「ロボット・ドローンが活躍する省エネルギー社会の実現プロジェクト」（中間評価）分科会 資料7，p. III- 348，2019年10月
- (2) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構，2017年度～2019年度成果報告書「ロボット・ドローンが活躍する省エネルギー社会の実現プロジェクト／無人航空機の運航管理システムおよび衝突回避技術の開発／準天頂衛星システムを利用した無人航空機の自律的ダイナミック・リルーティング技術の開発」，成果報告書データベース報告書管理番号20200000000335，p. 36，2020年2月
- (3) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構，「ロボット・ドローンが活躍する省エネルギー社会の実現プロジェクト／無人航空機の運航管理システムおよび衝突回避技術の開発／単独長距離飛行を実現する運航管理機能の開発（離島対応）」2020年度～2021年度のうち2020年度分中間年報，成果報告書データベース報告書管理番号20200000000480，p. 3
- (4) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構，Focus NEDO，No. 75，pp.10-11，2019年12月