

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：82723

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K13772

研究課題名（和文）超広帯域レーダによるドローンの遠隔検知・識別技術の研究

研究課題名（英文）Study on a drone detection and classification technique using ultra-wideband radar

研究代表者

中村 僚兵（Nakamura, Ryohei）

防衛大学校（総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工学群）・電気情報学群
・准教授

研究者番号：70735969

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、超広帯域（UWB）レーダを用いてドローンの遠隔検知・識別を行う手法の構築を行ったものである。その成果として、高距離分解能なUWBレーダを用いることで識別に有効なドローン固有の特徴的な反射波が得られることを明らかにした。また、深層学習を用いてその特徴的な反射波からドローンと鳥だけでなくドローンの機種を識別する手法を構築し、その有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、既存システムと同等以上の検知性能をもちながら、可搬性、低コスト化を可能とするレーダ単体によるドローン検知システムの実現のための技術の確立を目指したものであり、今後必要性が益々増すであろうドローン検知システムへの社会的貢献度は高い。また、国内外でドローン検知にUWBレーダを用いた報告はなく、ドローンの特徴的な反射波が得られることを明らかにしたことは学術的価値が高い。さらに、本研究を通して明らかにした各種ドローンの反射特性やレーダ反射断面積は他の研究開発者のリファレンスとなることが期待されることから学術的貢献度及び波及効果も高く、既に国内外の研究者から研究成果の引用もされている。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to develop a method for detecting and classifying of drones using an ultra-wideband (UWB) radar. As a result, we have confirmed that the use of UWB radar provides unique radar echoes that is effective in classifying drones. In addition, from the unique echoes, we developed a method to classify not only drones and birds but also drone models using deep learning, and confirmed its effectiveness.

研究分野：計測工学

キーワード：ドローン検知 レーダ 超広帯域 識別 深層学習

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、ドローンは空撮や災害時の観測、荷物配送など様々な分野での活用が期待されており、比較的操作简单で安価であるため個人用途としても普及し始めている。しかし、重要施設やイベント会場などへの無許可飛行が問題となっていることやテロに使用される危険性もある。そこで、ドローンを検知し、捕獲等の対策を講じるシステムの実現が喫緊の課題となっている。本システム実現のためには、ドローンを可能な限り早期（遠方から）に検知し、また鳥等の他の飛来物に対して高精度に分離識別できる技術を確認することが重要である。これまでにカメラや集音マイク、狭帯域レーダなどの検知技術を併用した検知システムが開発されているが、システム構成が大規模であり、高コスト化や運搬・設置が大変なことや検知技術自体に技術的な課題がある。以上の背景から、本研究ではこれらの課題を解決し、低コストかつ可搬性を実現可能な超広帯域レーダによるドローンの遠隔検知識別技術を確認する。

2. 研究の目的

既存システムの課題の解決のためには、各検知技術単体の性能の向上を図ることで検知性能を維持しながら、複数の技術の組み合わせに頼らずにシステムを実現（簡易化）することが重要である。また、既存システムを構成する検知技術には技術的な課題もある。例えば、カメラは対象の識別には有効だが夜間など天候に左右されることや検知距離が短く、集音センサは周囲の騒音（外乱）により検知できない可能性がある（イベント会場等では大きな騒音が予想）。電波到来検知センサは無線信号を検知するため検知可能距離が長い、同じ周波数帯を使用する無線システムが多数存在するため誤検知が起きる。一方、レーダは全天候性であり、また外乱の影響も受けづらい。但し、既存システムに使われている狭帯域レーダでは、接近する物体の検知はできてもドローンかどうかの識別は困難であり、別途カメラ等の識別技術が必要となる。また、距離分解能が低いと複数のドローンを同時に検知することは困難である。そこで本研究では、既存システムの運用上及び技術的な課題を解決するために、距離分解能に優れた超広帯域（UWB）レーダを用いてドローンを遠隔検知し、他の飛来物と分離識別する技術を確認することを目的とする。

3. 研究の方法

本補助事業の開始前までに UWB レーダによるドローン検知の可能性を検討するための初期検討としてドローンの反射信号特性の調査を行っており、準ミリ波帯（24/26GHz）において典型的なドローン（DJI Phantom3）のレーダ反射断面積（RCS）と飛行中の反射特性を実験的に明らかにした。なお、RCS は目標物からどれほどの反射が得られるかを表すレーダシステム設計の基本となる重要な指標である。その結果、高分解能な UWB レーダにより、図 1 のようにドローンの特有の特徴的な反射波（ボディおよび前後ローターからの反射波の分離）が得られることが判明した。しかしながら、特定のドローンに対してのみの検討に留まっており、一般性の実証には至っていない。また、ドローンの特徴的な反射波から鳥などの他の飛来物と分離識別する技術を確認する必要もある。そこで、以下の研究を実施する。

(1) 複数の種類のドローンに対する RCS 計測及び飛行時の反射特性解析

大きさやローターの数の異なる複数のドローンに対して RCS 計測と実際に飛行させて実験を行い、ドローンの反射特性の解明と特徴の一般性の実証を行う。

(2) ミリ波帯（79GHz）での RCS 計測及び飛行時の反射特性解析

近年、準ミリ波帯以上の広帯域が占有できることで（より高分解能化できる）研究開発が活発化しているミリ波帯（79GHz）でのシステム実現も視野に入れて同様の計測実験を実施し、準ミリ波帯の結果と比較評価を行う。

(3) ドローンと他の飛来物の分離識別手法の開発

明らかにしたドローンの反射特性を基にドローンと他の飛来物の識別手法を開発する。具体的には、受信信号からドローンの反射信号群を取り出し、ボディおよび前後ローターからの反射波を抽出する。その後、その反射信号数や強度を特徴量として、パターン認識性能が優れたアルゴリズムの 1 つであるサポートベクターマシンを用いて識別を行う手法 (1) を考案し、その識別性能を評価する。また、研究の過程で新たに深層学習法を用いた識別法 (2) についても考案したため、その識別性能についても評価する。

4. 研究成果

(1) 複数の種類のドローンに対する RCS 計測及び飛行時の反射特性解析

図 2 に示した大きさや形状の異なる 5 種のドローン（A～E）について RCS と飛行中の反射信号の計測実験を実施した。また、実際の鳥の飛行姿勢とよく似た翼を羽ばたかせて飛行する鳥型ラジコン（F）の反射信号についても計測した。

各ドローンを 360 度水平方向に回転させて計測した RCS の分布をアンテナ偏波を水平-水平（H-H）と垂直-垂直（V-V）の場合について比較した。H-H 偏波の場合は、A～E のドローンの RCS の平均値はそれぞれ -8.1 dBsm、-16.7 dBsm、-12.6 dBsm、-18.5 dBsm、-17.5 dBsm であった。また、V-V 偏波の場合は -9.0 dBsm、-17.2 dBsm、-11.7 dBsm、-17.0 dBsm、-19.1 dBsm であった。ドローンの RCS はドローンを構成する部品の形状に依存して、どちらか一方の偏波に優れているのではなく、概ね 2~3dBsm ほどの差異が生じることを

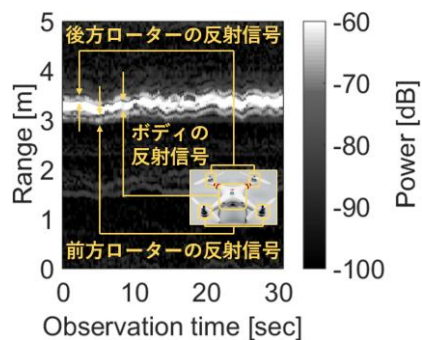


図 1 実験結果の一例

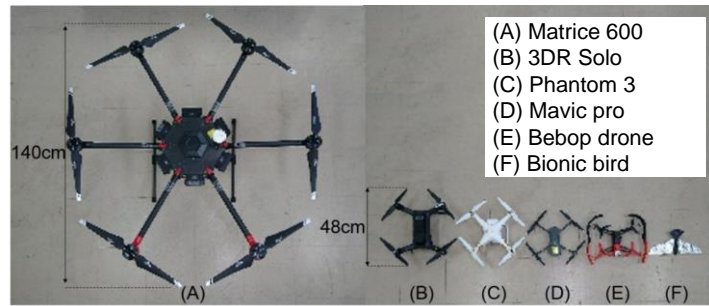


図2 計測したドローン

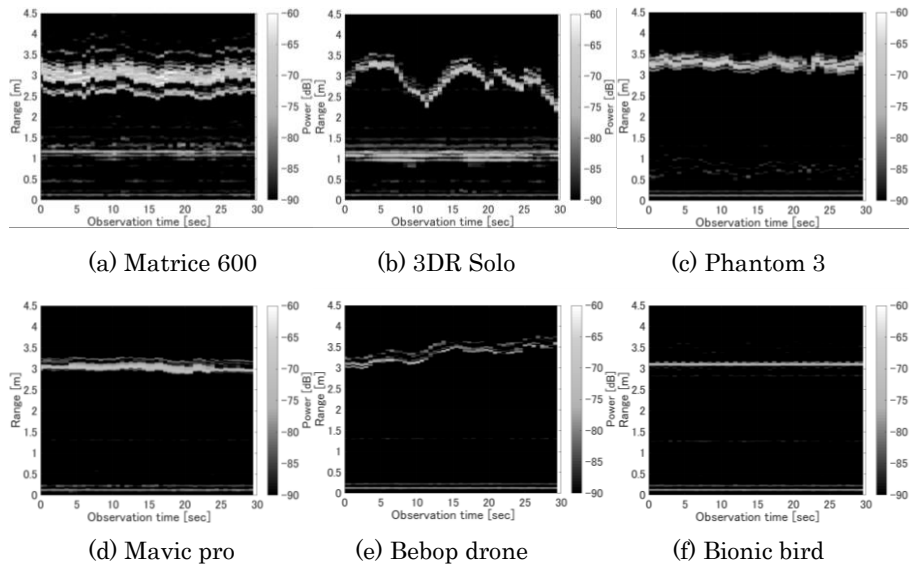


図3 各種ドローンの反射信号

確認した。従って、レーダシステム設計の際には偏波によりこのような差異があることを考慮したうえで設計する必要があることがわかった。

図3に各ドローンをホバリングさせたときの距離に対する信号強度分布(レンジプロファイル)を示す。また、鳥型ラジコンを治具に固定し、翼を羽ばたかせたときのレンジプロファイルも示している。図3から、全てのドローンについて複数の反射信号群が得られており、ボディとローターからの反射信号の分離が確認できることから、UWBレーダを用いれば本体形状やローターの数に関わらず、ドローン固有の反射波が得られることがわかった。また、鳥型ラジコンの反射信号はドローンの反射信号とは特徴が異なることからドローンと鳥の分離識別が期待できることも明らかとなった。

(2) ミリ波帯(79GHz)でのRCS計測及び飛行時の反射特性解析

図4にPhantom3を360度水平方向に回転させて計測したRCSの分布を示す。なお、アンテナ偏波はH-Hとした。図4からミリ波帯(79GHz)におけるドローンのRCSは準ミリ波帯(24GHz)に比べて平均的に約9dBsm大きくなることがわかった。また、図5にPhantom3をホバリングさせたときのレンジプロファイルを周波数ごとに示す。図5からミリ波帯を使用しても前述したドローン固有の反射波が得られることを確認した。以上の結果から広帯域を利用可能なミリ波帯でのドローン検知が期待できることがわかった。

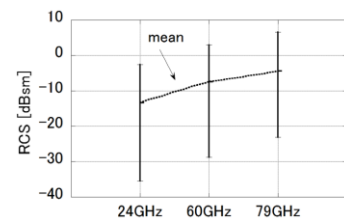


図4 周波数に対するPhantom3のRCSの差異

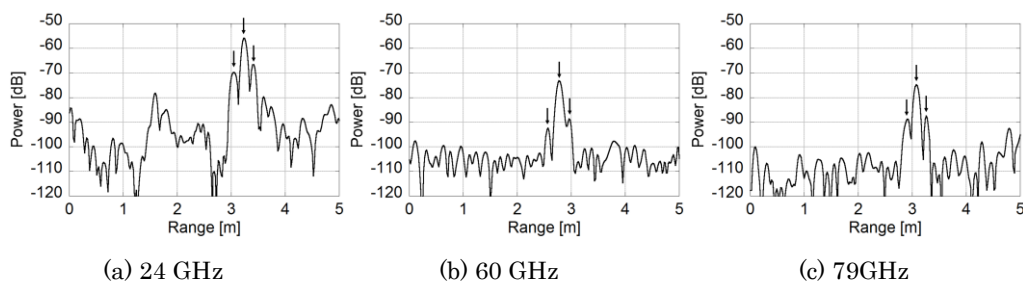


図5 Phantom3のレンジプロファイル

(3) ドローンと他の飛来物の分離識別手法の開発

① サポートベクタマシンを用いた手法

項目(1)や(2)の検討において距離分解能に優れた超広帯域レーダを用いればドローン固有の特徴的なレンジプロファイル（ボディと前後ローターの反射波の分離）が得られることがわかった。そこで、この特徴を識別のための特徴量の一つとして、サポートベクタマシン（SVM）を用いてドローンと鳥に見立てた鳥型ラジコン、ドローンの各機種の識別を行った。

SVMを適用するために行った前処理について図6を用いて説明する。目標の受信電力は対象の大きさや形状によって異なるため、識別のための有効な特徴量の一つとなると考えられる。レンジプロファイルからは、目標の受信電力が得られるが、その大きさは対象の大きさや形状だけでなく、目標の距離によっても変化する。そこで、目標の受信電力を距離によって変動の無いRCS値に変換し、これを1つ目の特徴量とした。図3で示したようにドローンと鳥型ラジコンは得られる反射波の数が異なる。そこで、2つ目の特徴量として、目標の反射波の極大値の数を抽出した。

まず、図7にSVMによるPthantom 3 (B)とBionic bird (D)の識別結果を示すが、評価方法に $k=10$ とした k 分割交差検証法を用いた。図7から分類境界によりBとDが明確に分離されている。この結果の汎化誤差は0%であり、RCS値と極大値の数を特徴量として選択することにより、ドローンと鳥を100%の精度で分類できることを示している。次に3種のドローン(A:Matrice 600, B:Phantom 3, C:Mavic pro)の識別結果と分類精度を図8と表1にそれぞれ示す。Aは大型のヘキサコプタータイプであり、BとCと比較してRCS値が高く、極大値の数も多いため100%の精度で分類できている。一方BとCは形状や大きさが比較的似ているため、RCS値に大きな差異はない。しかしながら、図3(c), (d)からわかるように、反射信号の違いによって極大値の数が異なるためBでは86%、Cでは96%と、どちらも高い精度で分類できている。

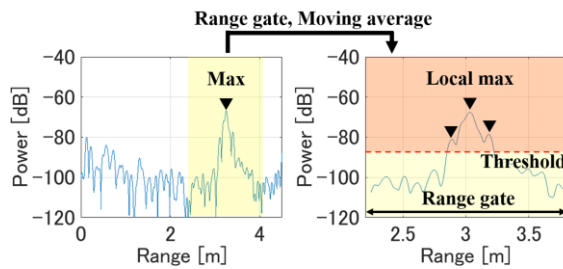


図6 前処理による特徴量抽出

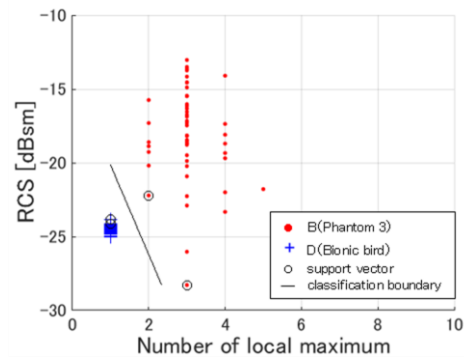


図7 Phantom 3とBionic birdの識別結果

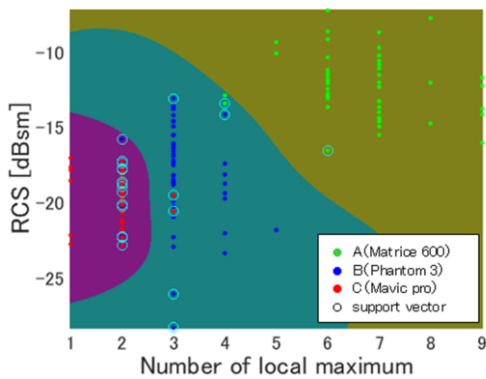


図8 3機種目のドローンの識別結果

表1 3機種目のドローンの分類精度

入力データ	分類精度 (%)		
	A(Matrice 600)	B(Phantom 3)	C(Mavic pro)
A(Matrice 600)	100	0	0
B(Phantom 3)	0	86	14
C(Mavic pro)	0	4	96

② 深層学習を用いた手法

項目①で示したように SVM による手法は各機種を高い精度で分類できることを確認したが、正確な特徴量の抽出には細かな閾値の設定が必要であり、抽出できる特徴量の種類も限られていた。そこで、図3に示したようなドローンのレンジプロファイルを画像として深層学習（畳み込みニューラルネットワーク（CNN））により識別させることを検討した。CNNを用いることで、抽出する特徴量を前もって選択する必要がなく、レンジプロファイルから得られる全ての情報を使って対象を識別することが期待できる。

CNNを適用するために、レンジプロファイルの受信電力をRCS値に変換し、ドローンの反射波の最大値を中心にレンジゲートをかけて単位計測時間ごとにレンジプロファイルの画像を抽出した（レーダ画像）。図9に抽出したレーダ画像の例をドローンの機種ごとに示す。このようなレーダ画像を機種ごとにCNNに学習させ、各機種の識別を行わせた。

まず、表2にレーダに対して正面でホバリングさせた場合のレンジプロファイルに対する識別結果を示

すが、どのドローンも約 90%以上の精度で識別できていることが分かる。

次に、レーダとドローンの位置や高度が様々な場合を含めたレンジプロファイルに対する識別結果を図 10 に示す。なお、CNN には層の深さの異なる様々なモデルがあり、識別性能が変化することから、代表的な 4 種の CNN モデル (AlexNet, GoogleNet, ResNet-50, ResNet-101) を用いてドローンの識別性能を比較検討した。その結果、どのモデルでも各種ドローンを 80%以上の精度で識別できることを確認した。なお、CNN の層を深くしても識別精度は横ばいであり、深層化による精度向上は難しいことが分かった。

レンジプロファイルには時間変化に機種ごとに一定の特徴があったことから、時系列データ (動画像) を取り扱うことのできる再起型ニューラルネットワーク (RNN) の LSTM と CNN を組み合わせた ConvLSTM を用いた場合の識別性能も検討した。図 11 に ConvLSTM に学習させた動画のフレーム数ごとの識別結果を示す。図 11 から、フレーム数を増やすことで扱う時系列データが増えたことから識別精度が向上しており、10 フレームの場合には約 96%の精度で識別できている。これらの検討の結果、CNN 単体よりも識別精度を向上できることを確認した。

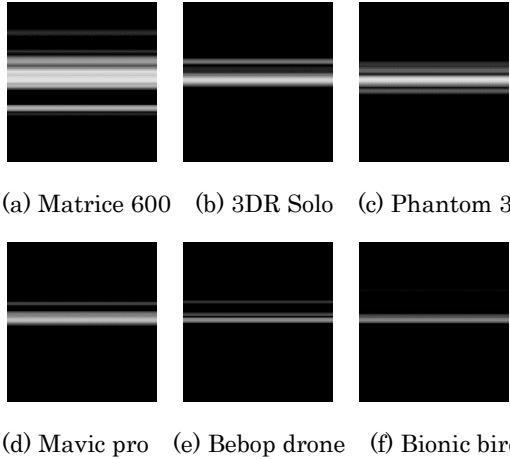


図 9 レンジプロファイルの画像から抽出したレーダ画像の例

表 2 CNN による識別結果

	Matrice 600	3DR Solo	Phantom 3	Mavic pro	Bebop drone	Bionic bird
Matrice 600	100 %					
3DR Solo		90.0 %	6.0 %	4.0 %		
Phantom 3		8.0 %	88.0 %		4.0 %	
Mavic pro		2.0 %		98.0 %		
Bebop drone				2.0 %	98.0 %	
Bionic bird						100 %

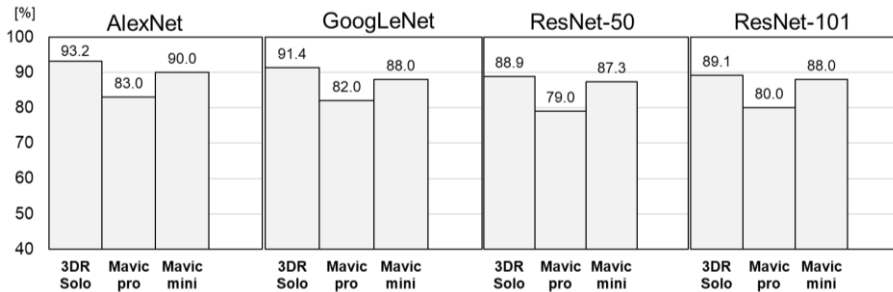


図 10 4 種の CNN モデルによる識別結果の差異

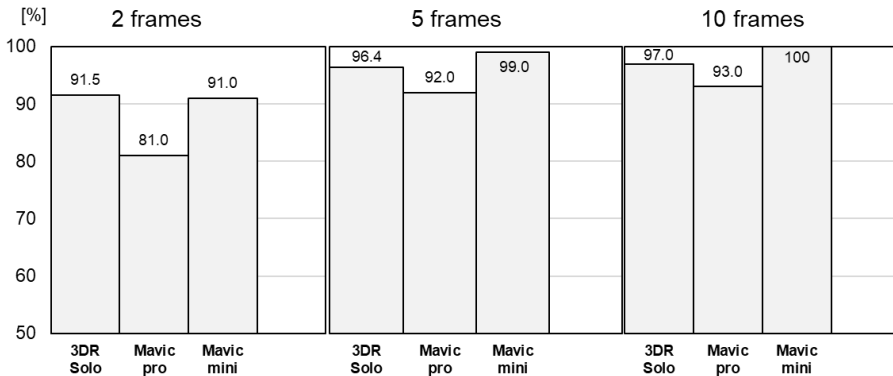


図 11 4 種の CNN モデルによる識別結果の差異

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 K. Jimi, R. Nakamura, and T. Ogitsu	4. 巻 10
2. 論文標題 Ego-vehicle speed estimation on spectral analysis using fast chirp modulation radar	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Communication Express	6. 最初と最後の頁 762-768
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/comex.2021XBL0124	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 R. Nakamura, K. Suzuki, and H. Hadama	4. 巻 9
2. 論文標題 RCS measurements of various drones at 24 GHz	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 262 ~ 267
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/comex.2020XBL0018	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 K. Jimi, I. Matsunami, and R. Nakamura	4. 巻 E102-B
2. 論文標題 Improvement of Ranging Accuracy during Interference Avoidance for Stepped FM Radar Using Khatri-Rao Product Extended-Phase Processing	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE Trans. Commun.	6. 最初と最後の頁 156-164
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transcom.2018EBP3042	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 R. Nakamura, N. Shimizu, and H. Hadama	4. 巻 7
2. 論文標題 Experimental study on human target localization system using a multistatic ultra-wideband sensor	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEICE Communication Express	6. 最初と最後の頁 394-399
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/comex.2018XBL0102	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 R. Nakamura, H. Hadama, and A. Kajiwara	4. 巻 7
2. 論文標題 Ultra-wideband radar reflectivity of a drone in millimeter wave band	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEICE Communication Express	6. 最初と最後の頁 341-346
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/comex.2018XBL0084	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 黒崎将史, 中村僚兵, 葉玉寿弥
2. 発表標題 ミリ波高速チャープ変調レーダを用いた複数のドローンの検知に関する基礎的検討
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 黒崎将史, 中村僚兵, 葉玉寿弥
2. 発表標題 ミリ波高速チャープ変調レーダによるドローンのマイクロドップラ特性に関する実験的検討
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 黒崎将史, 川口大貴, 中村僚兵, 自見圭司, 葉玉寿弥
2. 発表標題 ミリ波高速チャープ変調レーダによるドローンのマイクロドップラ特性に関する基礎検討
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川口大貴, 中村僚兵, 葉玉寿弥
2. 発表標題 超広帯域レーダのレンジプロファイル画像を用いたConvolutional LSTMに基づくドローンの識別手法の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川口大貴, 中村僚兵, 葉玉寿弥
2. 発表標題 超広帯域レーダのレンジプロファイル画像を用いた各種CNNモデルによるドローンの識別精度の比較検討
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 D. Kawaguchi, R. Nakamura, H. Hadama
2. 発表標題 Evaluation on a Drone Classification Method Using UWB Radar Image Recognition with Deep Learning
3. 学会等名 Proc. of 2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference Spring (VTC2021Spring) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平山尚幸, 川口大貴, 中村僚兵, 葉玉寿弥
2. 発表標題 ミリ波高速チャープ変調レーダによるドローン検知の基礎検討
3. 学会等名 電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川口大貴, 中村僚兵, 葉玉寿弥
2. 発表標題 超広帯域レーダを用いた深層学習に基づくドローンの識別手法の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川口大貴, 中村僚兵, 葉玉寿弥
2. 発表標題 深層学習に基づく超広帯域レーダによるドローンの識別に関する基礎検討
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Mizushima, R. Nakamura, H. Hadama
2. 発表標題 Reflection characteristics of ultra-wideband radar echoes from various drones in flight
3. 学会等名 Proc. of 2020 IEEE Topical Conference on Wireless Sensors and Sensor Networks (WisNet2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 水嶋巧, 中村僚兵, 葉玉寿弥
2. 発表標題 超広帯域レーダによる各種ドローンの識別に関する基礎検討
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 水嶋巧, 中村僚兵, 葉玉寿弥
2. 発表標題 超広帯域レーダによる飛行時の各種ドローンの反射特性
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 有馬蒼一郎, 奥田和也, 中村僚兵, 葉玉寿弥
2. 発表標題 集中制御型自動走行システムの固定カメラによる走行車測位技術の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木貫太郎, 松高諒典, 中村僚兵, 葉玉寿弥
2. 発表標題 各種ドローンに対する超広帯域レーダ反射特性の研究
3. 学会等名 電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------