

無線ネットワークによる悪用されたマルチコプター検知手法に関する研究

代表研究者	山口 英	奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科	教授
研究分担者	山本 寛	立命館大学情報理工学部	准教授
研究分担者	樫原 茂	奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科	助教

1 はじめに

現在、様々なマルチコプターが開発されており[1-4]、配達や災害時などの幅広い分野におけるサービス展開が期待されている[5-11]。一方で、マルチコプターを悪用した事件が発生し[12-14]、適切な使用に対しても規制が働きつつある。このようなマルチコプターの悪用に対して、米国をはじめ日本でも様々な法規制が行われつつある。

しかしながら、このようなマルチコプターの悪用に対して過度な法規制は、マルチコプターを適切に用いたサービスの発展を萎縮させることにもつながる。一方で、マルチコプターを悪用する者においては、たとえ過度な法規制があったとしても悪用すると考えられる。そのため、過度な法規制よりも、悪用されているマルチコプターを探知するための仕組みが重要となる。しかし、現時点では、マルチコプター自体を探知するための技術的手法が十分に確立していない。

そこで、本研究では、マルチコプターによるサービスが本格化する前に、マルチコプターがもたらす危険性を明らかにした上で、無線ネットワークを用いて、飛行中のマルチコプターの接近検知、及び検知したマルチコプターの脅威度に関する研究を実施した。本研究では主に以下の2点の研究を実施した。

- 1) 飛行中のマルチコプターの検知に関する研究
- 2) UAV (Unmanned Aerial Vehicle) コンシェルジュシステムに関する研究

1)に関しては、申請者らは2014年の段階で文献[15]において、マルチコプターの危険性について述べ、無線ネットワークの packets 取得がマルチコプターの接近を検知するための判断材料の一つとして使用できる可能性があることを示した。そこで、1)では、実環境において、無線ネットワークにおけるマルチコプターからの送信パケットの取得による調査研究を実施し、有効性の評価を行った。1)では2つの調査を実施し、1つ目の調査では、Wi-Fi 通信を監視するためのシステムとして、奈良先端大に敷設されているWi-Fi ネットワーク運用システム(以下、AirWave[16])を用いた検知を行った。次に、2つ目の調査では、マルチコプターが送信するビーコンフレームの特性を調査するため、ノート PC に搭載している無線 LAN デバイスをビーコンフレームの受信センサとして活用し、複数台のノート PC を等間隔に配置した環境において、飛行中のマルチコプターが送信するビーコンフレームの受信時刻及びその信号強度について取得し、評価した。

2)においては、飛行中のマルチコプターの脅威度判定を行うための情報を取得するために、マルチコプターを安全に利用しようと考えている操縦者をサポートするための UAV コンシェルジュシステムの概念を提案した。UAV コンシェルジュシステムは、マルチコプター利用に伴う運用規定を規則化し、情報の蓄積等を行う機能により、マルチコプター利用者の安全対策を支援することで、マルチコプターの安全な飛行環境を構築することを目指す。つまり、飛行中のマルチコプターを検知した際に、UAV コンシェルジュシステムに登録されているマルチコプターは利用情報が記録されているため、脅威度は低いと考えられ、登録されていない場合は脅威度は高いと判断する情報の一つとなる。2)では、特に、提案システムにおけるフライト情報の登録管理機能について着目し、必要な情報や情報の流れを調査し、それを実現するために必要な機能等についてまとめた。

以下、2節では関連研究について述べ、3節では飛行中のマルチコプターの検知に関する調査結果について述べる。4節では、UAV コンシェルジュシステムについて述べる。最後に、5節において本研究をまとめる。

2 関連研究

マルチコプターによるプライバシー侵害や悪用を防ぐための方法が、制度・技術の両面から取り組まれている。NoFlyZone[17]というサービスでは、利用者はマルチコプターが飛んで欲しくない場所の住所やGPS情報をNoFlyZoneのデータベースに登録する。一方、マルチコプター側はこれらの情報に基づいて飛行禁止区域として設定された場所へ侵入しないよう設定される。このサービスを実現するにはマルチコプターを開発し

ているメーカーの協力が不可欠であるが、Parrot 社[18]やDJI 社[19]などの大手メーカーの賛同は得られていない。

また DroneShield[20]は、マルチコプターが飛行時に出す特徴的なモータ音に着目し、マイクロフォンが収集した音に、マルチコプターが出す特徴的な音が含まれているか調査する。さらに、各マルチコプターが飛行時に出す音を事前に解析してデータベースを構築しており、マイクロフォンが収集した音の解析結果と照合させることで、どのマルチコプターが接近しているか判別することも可能である。しかし、文献[14]では、音を利用した検知手法だけでは、風などのノイズがある場合や、モータ音が無い固定翼の無人航空機の検知は困難であろうと述べられている。

一方、カメラで撮影した画像を解析することでマルチコプターの検知が可能と一部メディアで述べられているが、カメラでマルチコプターの飛行可能空域を全て撮影し、分析することは困難である。また、マルチコプターの発する熱を感知してマルチコプターを検知する方法も検討され始めているが、これも撮影可能範囲が広い場合、実現は困難である。実際、我々の研究グループではサーモグラフィを用いて、マルチコプターが飛行している空域を撮影する実験を行った(図1)。図1に示すように、背景に何も無い環境ではマルチコプターを検知できる可能性はあるが、背景がビルなどの場合、検知は困難であることがわかる。つまり、音や映像を用いたマルチコプターの検知の可能性はあるが、それぞれの情報が異なる特性を持つため、それらの情報を効果的に利用することが求められる。

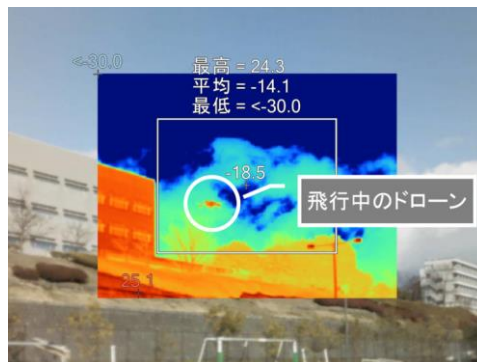


図 1 サーモグラフィによる飛行中の AR. Drone2. 0 の撮影

これまで、我々の研究グループは2014年DICOMOにおいて、マルチコプターの検知に関するマルチコプター用統合監視システムに関するコンセプトを提案した[15]。文献[15]では、音・映像等の1種類の観測対象だけに着目してマルチコプターを検知することは困難であり、図2に示すように複合的な情報を収集し、分析する必要があることを述べた。また、文献[15]ではWi-FiパケットキャプチャによりAR. Drone 2.0(以下、AR. Drone)の飛行検知を行える可能性があることを示した。

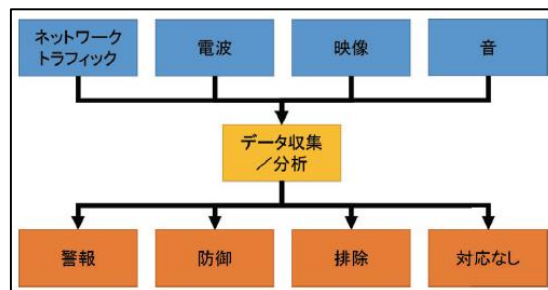


図 2 統合監視システム概念図

3 飛行中のマルチコプターの検知に関する研究

2 節で述べたように、我々は複数種類の情報を総合的に分析し、マルチコプターを検知することを検討し

ているが、これを実現するには各情報を利用した検知の有効性と限界を明らかにする必要がある。そこで、本研究では統合監視システムの観測対象として、我々が最も有力視しているマルチコプターの無線通信時の電波を利用した検知について2つの調査を実施した。1つ目の調査では、Wi-Fi通信を監視するためのシステムとして、AirWaveを用いた検知、2つ目の調査では、複数台の受信センサによるマルチコプターのビーコンフレームの受信時刻及びその信号強度の評価を行った。なお、本調査では、AR. Droneを検知対象マルチコプターとした。以下、3.1節では1つ目の調査について、3.2節では2つ目の調査について述べる。

3-1 Wi-Fi ネットワーク運用システム (AirWave) を用いた調査

AR. Droneは基本的にアクセスポイント (AP) として動作し、スマートフォンやPCなどの操縦端末はステーションとして動作する。AR. Droneは、操縦端末に表示されるインタフェースを操作して、一般的なラジコン飛行機のように操作できる手動操縦と、地図上で設定した中継点や目的地に沿って自動的に飛行可能な自動操縦に対応している。手動操縦時には、AR. Droneは操縦端末との間で、操作情報、姿勢情報、位置情報、及び機体情報等のテレメトリ情報を送受信するが、自動操縦時にはAR. Droneと操縦端末間の接続が切断されるとこれらのテレメトリ情報の送受信は行われぬ。しかし、AR. DroneはAPとして動作しているため、通常のAPと同様にビーコンフレームを定期的にブロードキャストしている。

本調査では、AR. Droneが定期的にブロードキャストしているビーコンフレームに着目し、AirWaveが提供している複数のWi-Fiセンサを利用して、ビーコンフレームの検知を監視したマルチコプター検知を試みる。ビーコンフレームは、AR. Droneだけでなく、モバイルルータやテザリング機能を有効にしたスマートフォン等からもブロードキャストされている。そのため、単純にビーコンフレームを観測するだけではマルチコプターの検知は不可能である。そこで、マルチコプターが上空を移動するといった特性に着目し、同じAPから送信されたビーコンフレームを複数のWi-Fiセンサが観測した場合、そのビーコンフレームの送信元がマルチコプターであると推定できると考えられる。本調査では、奈良先端大に敷設されているAirWaveのWi-Fiセンサを利用する。AirWaveは無線、有線、リモート・ネットワークの総合管理ツールであり、ネットワークを利用しているユーザーや、そのユーザーの場所、ネットワークパフォーマンスを地図上に分かりやすく表示する機能を有するほか、不正AP、不正クライアントによる無線網への侵入イベントを収集するセキュリティ機能も有している。しかし、本システムは、実運用で使用されているため、モニタリングのタイミング等の設定に関しては制限があった。そのため、本調査では、いくつかの制限の中で、マルチコプターをWi-Fiセンサで検知する際の可能性と限界について調査した。

調査結果をまとめると、地上に設置されたAPなどに比べると、上空を移動するマルチコプターは複数のWi-Fiセンサにより検出され、その配置は広範囲に渡っていることが明らかとなった。そのため、AirWaveの機能を活用することで、マルチコプターを検知できる可能性があることが示された。これは、AirWaveの多数のWi-Fiセンサを管理・統制する機能がマルチコプター検知に対し有効に機能したためであり、空中を移動するマルチコプターを検知するという本来の目的とは大きく外れた使用にも関わらず、一定の成果を上げることができたと考えられる。しかし、監視対象の環境が都市部のような建物が密集する狭隘環境では検知が非常に困難であることも判明した。この狭隘な環境については、カメラ、サーモグラフィ及びマイクによる単体機能の監視も困難な環境であるため、複数の情報による効果的な監視が必要となる。

今回の実験では、運用中のシステムを利用した形で実験を行ったため多くの制約があった。このようなWi-Fiを用いた検出精度を上げるためには、以下の方法が考えられる。まず、検出インターバルにおいては、実時間で検出を行うことでより移動方向や速度などの多くの情報を得ることができると考えられる。また、実時間の検出とビーコンフレームの受信電波強度と組み合わせることでより精度の高い検出を行うことも可能になると考えられる。一方で、電波伝搬環境が検出精度に強く依存するため、Wi-Fiセンサの配置方や時間帯を考慮した検出手法が必要となる。

3-2 マルチコプターが送信するビーコンフレームの特性調査

前節では、運用中のAirWaveを利用してマルチコプターが発信するビーコンフレームの評価を行った。設置されているWi-Fiセンサの検知範囲は学内全域をカバーしており、マルチコプターの飛行を監視する手段として、マルチコプターが発信するビーコンフレームの利用は有効であることを示した。しかしながら、奈良先端大のAirWaveの運用上の制約から、ビーコンフレームの受信頻度は30分に1回と低く、また詳細な受信時刻も不明であった。よって、引き続きマルチコプターが送信するビーコンフレームの特性を調査する

ために、詳細な受信時刻を取得可能な受信センサを用いてデータ取得を行った。具体的には、無線 LAN デバイスを搭載したノート PC をビーコンフレームの受信センサとして利用し、複数台のノート PC を等間隔に配置した環境において、飛行中のマルチコプターが送信するビーコンフレームの受信時刻およびその信号強度について調査した。

本実験では、マルチコプターを飛行させて、マルチコプターが送信するビーコンフレームの受信を実施したが、比較対象としてスマートフォンのテザリング機能を使用して、地上を移動するスマートフォンが発信するビーコンフレームとどのような違いがあるかについて確認を行った。

実験結果より、マルチコプターが送信するビーコンフレームと、スマートフォンが送信するビーコンフレームでは受信センサが受信可能な距離が大きく異なることが明らかとなった。これは、それぞれのデバイスの設計方針によるところが大きいものと考えられる。マルチコプターの場合、その通信は操縦及び操縦に必要な情報を送信するためのものであるため、可能な限り通信距離を広範囲に確保すべきであり、仮に接続状態のネットワークが切断した場合においても、速やかに再接続を行う必要がある。そのため、ビーコンフレームにおいても長距離に到達するために発信する信号強度も高く設定されている可能性が高い。しかし、スマートフォンのテザリング機能においては、実際に使用するネットワークの範囲は個人が所有しているデバイス間で通信が確保されておけば十分であるため、また、消費電力の観点からも、信号強度が小さく設定されていると考えられる。この結果から、本実験で使用した機材では、受信センサの設置間隔を 40m で設置した場合、同時刻におけるビーコンフレームを受信したセンサ数により、マルチコプターとスマートフォンの違いを判別することは可能であることが分かった。

4 UAV コンシェルジュシステムに関する研究

マルチコプターと呼ばれる小型無人航空機による事故等により、マルチコプター利用に対する危険性が危惧されている。事故の背景要因として、マルチコプター利用に伴う運用規定が定まっておらず、安全な飛行を行うのは操縦者個人の操縦技術によるところが大きいことが挙げられる。また、事故の再発を防ぐための情報分析や共有ができていないことも要因としてある。今後マルチコプターによる被害を生起させないためにも、マルチコプターのフライト情報等を収集、分析、共有して事故の背景要因となる事項を特定し、マルチコプターの利用に対する安全性を高めることが急務である。

国内で現在行われているマルチコプターの安全な利用に対する対策としては、規制強化や飛行禁止エリアに侵入させないような事例がほとんどである。また、海外においても国内同様に規制があるが、車のようにマルチコプターの交通管理を行う取り組みが進んでいる。しかし、いずれもマルチコプターの安全な利用を支援する取り組みは少ない。

以上の状況を踏まえ本研究では、まず、我々が提案するマルチコプターの安全な利用を支援する UAV コンシェルジュシステムの概念を提案した。提案システムは、マルチコプター利用に伴う運用規定を規則化し、情報の蓄積等を行う機能によりマルチコプター利用者の安全対策を支援することで、マルチコプターの安全な飛行環境を構築することを目指す。提案する UAV コンシェルジュシステムは、マルチコプター利用者の安全対策を支援する機能を提供する。以下に、システム概要及び機能等について述べる。

まず、本システムで対象とするシステム利用者を定義する。

- ・利用者：マルチコプターの利用者
- ・閲覧者：システム上に蓄積されたマルチコプターのフライト情報を閲覧する利用者
- ・管理者：事故分析補助を行うシステム管理者

そして、本システムの概要を図 3 に示す。まず、利用者においては、マルチコプターを安全に利用するために、事前準備を行うことが求められる。事前準備においては、機体整備や天候確認、飛行経路の設定等を行う。本システムでは、それらの情報をまとめたフライトプランのフォームを利用者に提供し、利用者はフライトプランを作成後、システムにアップロードする。本システムでは、アップロードされたフライトプラン中の設定した飛行経路と蓄積されたフライトプランの時間及び地理情報や、飛行禁止エリアを記録した地図と照合し、他のフライトプランと重複していないか等を確認する。そのため、利用者はマルチコプター利用に際して、フライトプランが安全か調査するための労力を本システムの利用により軽減することができる。また、システムは過去の利用者のフライトプランやフライトレポートも提供することを考慮しているため、他の利用者の安全対策等も参考にできる。フライトレポートとは、マルチコプター操縦終了後に作成する飛

行実績をまとめたもので、操縦中の天候や実際の飛行経路等を記載する。フライトレポートを活用することで、次回以降マルチコプターを利用する際の意思決定に寄与できる。

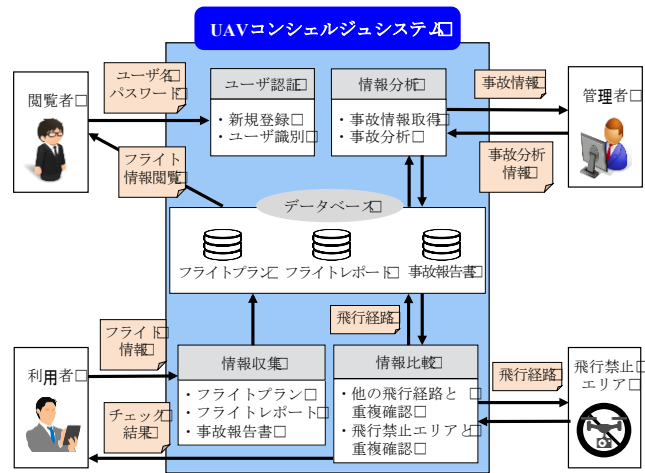


図 3 UAV コンシェルジュシステム概要

次に、観覧者は本システムに蓄積されているフライトプランやフライトレポート、事故報告書を閲覧することができます。観覧者は、自らの飛行を計画する前に蓄積された情報を閲覧することで、他のフライトプランを参考にすることができます。また、事故報告書の閲覧は、過去の事故の教訓を活かすことができるため、事故の未然防止に寄与できる。

管理者は利用者が行う事故分析を補助する。マルチコプター利用に伴う事故が発生した際には、利用者が事故分析を行う必要がある。しかし、当事者のみの事故分析では、分析内容や再発防止策の妥当性を評価するのが困難であるため、管理者がこれを補助する。管理者は、システムに蓄積されている過去に発生した事故の内容に関する情報(事故報告書)から、発生した事故と似ている過去の事例を抽出し、利用者の行う事故分析を補助することで、利用者の事故報告書の作成を支援し、再発防止策を提供する。

本システムでは、利用者は事前登録を必要とする。利用者の視点で考えた場合、システム側で利用者を識別することで、自らが作成したフライトプランやフライトレポートを次回以降もまとめて管理できる。本研究では特に、提案システムにおけるフライト情報の登録管理機能を設計する上で、必要な情報や情報の流れを調査し、それを実現するために必要な機能等について検討を行った。

5 おわりに

研究では、マルチコプターによるサービスが本格化する前に、マルチコプターがもたらす危険性を明らかにした上で、無線ネットワークを用いて、飛行中のマルチコプターの接近検知、及び検知したマルチコプターの脅威度に関する研究を実施した。本研究では特に以下の内容に取り組んだ。

- 1) 飛行中のマルチコプターの検知に関する研究
- 2) UAV (Unmanned Aerial Vehicle) コンシェルジュシステムに関する研究

1)に関しては、申請者らは2014年の段階で[3]において、マルチコプターの危険性について述べ、無線ネットワークの packets 取得がマルチコプターの接近を検知するための判断材料の一つとして使用できる可能性があることを示した。そこで、本研究では、実環境においてマルチコプターの無線ネットワークの packets 取得による調査研究を実行し、有効性の評価を行った。1つ目のアプローチとして、Wi-Fi 通信を監視するためのシステムとして、奈良先端大に敷設されている Wi-Fi ネットワーク運用システム (AirWave) を用いた検知を行った。評価結果より、上空を移動するマルチコプターは地上を移動するモバイルルータなどの AP と比較して、検出する Wi-Fi センサ数や検出範囲が異なる可能性が高く、それらの情報をもとにマルチコプターを検知できる可能性があることを示した。次に、2つ目のアプローチとして、マルチコプターが送信するビーコンフレームの特性を確認するため、PC に搭載している無線 LAN デバイスをビーコンフレーム受信セン

サとして活用し、複数台の PC を等間隔に配置した環境において、マルチコプターを飛行させる。そして、マルチコプターが送信するビーコンフレームの受信時刻及びその信号強度について取得し、評価を行った。本実験結果においては、飛行高度が 20m 以下であれば、マルチコプターの接近を検知できる可能性が十分にあることがわかった。また、複数センサを比較することで、より正確にマルチコプターの検知の可能性が高まることを示した。

2)においては、飛行中のマルチコプターの脅威度の判定を行うための情報を取得するために、マルチコプターを安全に利用しようと考えている操縦者をサポートするための UAV コンシェルジュシステムの概念を提案した。UAV コンシェルジュシステムは、マルチコプター利用に伴う運用規定を規則化し、情報の蓄積等を行う機能によりマルチコプター利用者の安全対策を支援することで、マルチコプターの安全な飛行環境を構築することを目指す。つまり、飛行中のマルチコプターを検知した際に、UAV コンシェルジュシステムに登録されているマルチコプターは利用に対する情報が記録されているため脅威度は低いと考えられ、登録されていない場合は脅威度は高いと考えることができる。本研究では、特に、提案システムにおけるフライト情報の登録管理機能について着目し、必要な情報や情報の流れを調査し、それを実現するために必要な機能等についてまとめた。

また、本研究の成果としては、国内研究会として 3 件発表し、招待講演として 2 件の講演を行った。最後に、本研究を助成して頂いた貴財団の研究調査助成事業に心より感謝の意を表する。

【参考文献】

- [1] E. Ackerman, "CyPhy Works' New Drone Fits in Your Pocket, Flies for Two Hours," IEEE Spectrum, posted on 23 Oct. 2014.
- [2] E. Ackerman, "Flying Robots Stay Stable With Just One Motor, Controllable With Two," IEEE Spectrum, posted on 28 Oct. 2014.
- [3] E. Ackerman, "SenseFly's eXom Drone Uses Vision and Ultrasound to Fly Precisely, Safely," IEEE Spectrum, posted on 6 Nov. 2014.
- [4] E. Ackerman, "A Smartphone Is the Brain for This Autonomous Quadcopter," IEEE Spectrum, posted on 31 Jan. 2015.
- [5] D. Schneider, "Flying selfie bots," Spectrum, IEEE, vol.52, no.1, pp.49-51, January 2015.
- [6] S. Cass and C. Gorman, "Video: Test Flying Parrot's Bebop Drone," IEEE Spectrum, posted on 24 Nov. 2014.
- [7] amazon Prime Air, <http://www.amazon.com/b?node=8037720011>.
- [8] E. Ackerman, "Yet Another Drone Delivery Trial, This Time in Asia," IEEE Spectrum, posted on 5 Feb. 2015.
- [9] K. Nagatani, et al., "Volcanic ash observation in active volcano areas using teleoperated mobile robots - Introduction to our robotic-volcano-observation project and field experiments," Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), 2013 IEEE International Symposium on, pp.1-6, Oct. 2013
- [10] E. Ackerman, "The Defibrillator Drone Is Another Good Drone Idea But Will It Work?," IEEE Spectrum, posted on 30 Oct. 2014.
- [11] E. Ackerman, "Flying Inventory Assistants Are a Good Use for Drones," IEEE Spectrum, posted on 8 Dec. 2014.
- [12] D. Schneider, "Would You Shoot Your Neighbor's Drone?," IEEE Spectrum, posted on 31 Dec. 2013.
- [13] The Guardian, "Fifa investigating France's claims that a drone spied on training," 14 Jun. 2014, <http://www.theguardian.com/football/2014/jun/14/france-drone-fifa-spying-investigation-world-cup>.
- [14] D. Schneider, "Can We Detect Small Drones Like the One That Crashed at White House? Yes, We Can," IEEE Spectrum, posted on 3 Feb 2015.

- [15] 岡本, 檜原, 山口, “マルチコプターを用いたサイバー攻撃に対する一検討,” マルチメディア, 分散, 協調とモバイル(DICOMO 2014)シンポジウム, pp.1741-1746, 2014年7月.
- [16] AirWave 統合管理システムデータシート,
<http://www.arubanetworks.co.jp/products/pdf/airwave.pdf>
- [17] No Fly Zone, <https://www.noflyzone.org>.
- [18] Parrot, <http://www.parrot.com/jp/>.
- [19] DJI, <http://www.dji.com>.
- [20] DroneShield, <https://www.droneshield.com>.

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Wi-Fi ネットワーク運用システムを用いたドローン検知の可能性に関する評価	マルチメディア, 分散, 協調とモバイル(DICOMO2015)シンポジウム, pp. 303-309	2015年7月
ビーコンフレームによる飛行ドローンの探知に関する検討	電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 115, No. 311, MoNA2015-24, pp. 13-16	2015年11月
UAV コンシェルジュシステムにおけるフライト情報の登録管理機能の検討	電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 115, No. 482, IA2015-88, pp. 17-22	2016年3月