

トイドローンの連携による動的な 接続切替制御機能の設計と試作

渡邊 滯月[†] 高橋 秀幸^{††}

近年、様々な分野でドローンの活用が検討されている。屋外では、GPSを搭載した高性能な大型・中型のドローンが災害時の被害状況の調査や点検等に利用されている。一方、屋内の調査や点検などには、狭い空間をBluetoothやWi-Fiで制御することで飛行可能な小型ドローン(トイドローン)の活用が検討されている。しかし、トイドローンの飛行可能距離は、100m程度であり、長距離の飛行が困難である。そのため、接続が切れるとフェールセーフ保護機能によって自動的に着陸や操縦画面が停止するなどの問題が発生する。本稿では、このような問題を解決するため、接続先の電波強度に応じて飛行中のドローンが他のドローンの無線中継器の役割を担うことで、より長距離飛行を可能にするためのトイドローンの連携による動的な接続切替制御機能、本提案機能の試作、本機能を用いた動作実験について述べる。

Design and Implementation of Dynamic Connection Switching Control Function based on Coordination of Toy Drones

Miduki Watanabe[†] Hideyuki Takahashi^{††}

In recent years, drones have become popular in various fields. Large, high-performance drones are used to survey and inspect damage in the event of a disaster, while small drones including toy drones, which can fly over small areas, are used to survey conditions indoors. However, small drones have limited flight range, making it difficult to fly long distances, and when using connection methods such as Bluetooth or Wi-Fi, they can only cover a range of about 100 meters at most. This causes problems such as automatic landing and the shutdown of the control screen if the connection is lost. To solve this problem, this paper describes a dynamic connection-switching control function that coordinates toy drones to enable longer-distance flights by having a drone in flight act as a radio repeater for other drones according to the signal strength of the connection destination, a prototype of this proposed function, and some operational experiments using this function.

1. はじめに

近年、景色の撮影だけでなく、災害や点検、運搬などの様々な分野でドローンが利用され、さらに新たな活用が検討されている。ドローンには、屋外での飛行を前提とした大型・中型のドローンや主に屋内での飛行を前提としている小型のドローンがある。災害時の被害状況の調査や点検には、屋外で飛行可能な高性能のドローンが利用されることが多く、屋内での状況調査や点検向けに、狭い空間でも飛行可能な小型ドローン(トイドローンなど)の活用が期待されている。屋外での飛行を前提としたドローンの多くは、GPSを搭載し、位置情報の取得が可能である。また、様々なセンサを搭載することで飛行中の安全性の向上、耐荷重能力を備えることで重量物の運搬が可能なドローンなどが開発および実用化されている。

一方、トイドローンの多くは、主に屋内での飛行を前提としており、GPSを搭載しておらず、風などの影響も受けやすい。また、小型かつ軽量であるため通信機能の性能も低く、飛行可能距離も短い。具体的には、トイドローンと送信機の接続手法にはBluetoothやWi-Fi等があり、最大で100m程度の飛行距離となる。トイドローンの多くは、送信機との接続が途切れるとホバリングを保つ場合やフェールセーフ保護機能によって自動的に着陸する場合、また、ドローンの操縦ができなくなる場合に加えて、ドローンのカメラからの映像が表示されないといった様々な問題が生じる。加えて、小型バッテリーで飛行するため、飛行時間および飛行可能距離が短いといった特徴がある。そこで、例えば、トイドローンで災害時などの屋内巡回支援などを行うためには、飛行可能距離が短い屋内全体の巡回ができないといった問題が生じる。

本研究では、トイドローン同士が連携し、飛行中のドローンが中継器の役割を担うドローンを介して飛行可能な距離を伸ばし、継続して操縦可能な機能の実現を目的とする。具体的には、飛行機能と飛行の制御コマンドを送受信するためのWi-Fi(無線)中継器となる機能を有するドローン同士が連携することで、ドローンの接続先の電波強度やバッテリー残量に応じて飛行と中継器の役割を切り替えながら、特定のドローンの長距離飛行を可能にするための動的な接続切替制御機能を提案する。本稿では、本提案機能の基本設計および試作、本機能を用いた予備実験について述べる。

2. 関連研究と技術的課題

屋外向けの高性能なドローンを活用し、離れて飛行している複数のドローンが中継器となり、通信信号のリレーを行うための研究開発や実証実験などが行われている

[†] 東北学院大学教養学部情報科学科
Department of Information Science, Faculty of Liberal Arts, Tohoku Gakuin University

^{††} 東北学院大学情報学部データサイエンス学科
Department of Data Science, Faculty of Informatics, Tohoku Gakuin University

[1-3]. 例えば、山や建物に隠れて制御側から電波が直接的に届かない場合や電波の減衰によって通信遅延が発生する場合などに対処するために、ドローンの制御側（操縦者）から最終地点の間に中継機が搭載されたドローンを飛行させることで、バケツリレーのように電波を繋ぎ、低遅延で制御することが可能となる。これらは、屋外での使用が目的である。また、遠隔操作ロボットのネットワーク構築に関する研究として、広範囲におけるロボット遠隔操作を実現するために、少数の中継器を用いた中継器展開アルゴリズムの研究の取り組みがある[4]。例えば、通信品質を取得し、通信品質が閾値を下回ると、操縦者と制御端末の中継器の距離を調整し、通信品質を維持した遠隔制御を可能にするものである。更に、中継器の機能を有するロボットを移動させることで無線メッシュネットワークを構築する研究などがある[5]。多くの先行研究では、屋外などの環境下で比較的駆動時間が長く、バッテリー容量の大きなドローンや自走ロボットなどを対象とした中継器に関する研究である。本研究では、屋内環境を想定し、飛行時間に加えて、飛行可能距離（通信距離）の短いトイドローンが、より長距離飛行ができるようになることが焦点となる。そこで、本研究では、トイドローンが連携し、飛行また中継器の役割を担うことで、操縦者の制御対象となるトイドローンの飛距離を伸ばすための接続切替制御機能を提案する。

3. 接続切替制御手法の提案

まず、本研究では、災害時などにトイドローンを活用した建物の屋内調査などを想定する。操縦者は、建物内に入ったり、移動したりせずにある地点からトイドローンを操縦することとする。そして、操縦者は、1台目のトイドローン離陸、飛行させ、調査を行う。1台目のトイドローンのバッテリーが低下あるいは通信が途切れそうな距離になると（設定した電波強度の閾値を下回ると）、そのトイドローンはその場に着陸し、中継器として動作するように役割を変更する。次に、新たに2台目のトイドローンを操縦者は飛行させて、同じルートで調査を継続する。1台目のトイドローンが中継器となっているため、2台目のドローンが1台目のトイドローンに近づくと、2台目のトイドローンが1台目の中継器となっているドローンに接続する。これにより、2台目のトイドローンは、通信距離が延びるため、操縦者は、1台目のトイドローンよりも2台目のトイドローンを操縦して、遠くの調査を行うことが可能になる。すなわち、調査に用いるトイドローンを1台ごと飛行させて、最初に飛行したトイドローンを踏み台のような形で中継器として利用することで、後から飛行するトイドローンの飛行可能距離を延ばす仕組みをトイドローン間の連携で実現を目指すアプローチを試みる。

本提案手法は、トイドローンが周囲の電波強度を自動で測定しながら飛行する。トイドローンと操縦者が操縦する端末（送信機、スマートフォン、パソコンなど）との

電波強度を測定しつつ、周辺に操縦者が操縦する端末よりも電波強度がより高い中継器があった場合には、動的に接続先の切り替えを行うことで、飛行を継続するものである。図1にトイドローンの連携による接続切替制御手法の概要を示す。

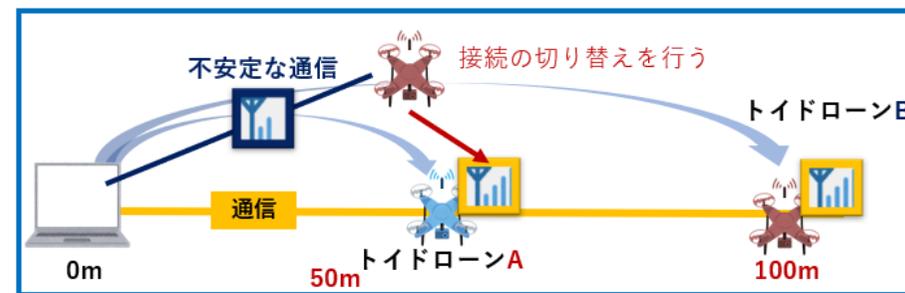


図1 トイドローンの連携による接続切替制御手法の概要

まず、図1では、操縦者が送信機となるPCからトイドローンAを操縦している。その際、トイドローンAは、送信機のPCから離れて飛行しつつ、電波強度を測定しながら飛行する。次に、測定した電波強度の値が閾値を下回り、周囲に接続可能な中継機能をもつトイドローンが無ければ、トイドローンAは、飛行を停止し着陸し、中継器としての機能に役割を変更し、中継器としてネットワークを構築する。次に、操縦者は、トイドローンBを送信機のPCから再度飛行させる。同様にPCとトイドローンBとの電波強度を測定しながら飛行し、PCとトイドローンB間の電波強度の値が閾値以下となり、中継器として待機しているトイドローンAとトイドローンB間の電波強度が閾値以上である場合、中継器として機能しているトイドローンAのネットワークに接続する。その後、操縦端末であるPCからの制御コマンドは、トイドローンAがバケツリレー方式で、トイドローンBに送信する形に切り替わり、トイドローンBは、トイドローンAを追い越しながら飛行を継続することが可能になる。以上を繰り返し実行しながら、後から飛行するトイドローンが長距離飛行を可能にする。

なお、飛行ルート上でトイドローンの一部がバッテリー切れや破損等の原因から通信不可能となる場合が想定される。そのため、通信不可能なトイドローンを把握可能にするために、一定間隔でpingによる死活監視を行う。

トイドローンの連携による接続切替制御を実現するための基本機能は、電波強度を測定する電波測定機能、中継器としての役割を担う中継機能、トイドローンと通信確認を行う監視機能の3つである。

4. 提案接続手法の設計と試作

4.1 使用機器

提案接続手法に用いる機器について述べる。試作システムで利用する機器のトイドローン1台使用時の構成を図2に示す。本稿で使用するトイドローン”Tello”には、中継器としてのネットワークを構築することが仕様上できないため、IPアドレスの設定を手動で行うことが可能で、無線ルータ機能をもつ”Raspberry Pi 3B+”をトイドローンの中継機能の一部として設計および試作を行った。すなわち、”Raspberry Pi 3B+”と”Tello”を本稿では、1つのトイドローンと仮定する。

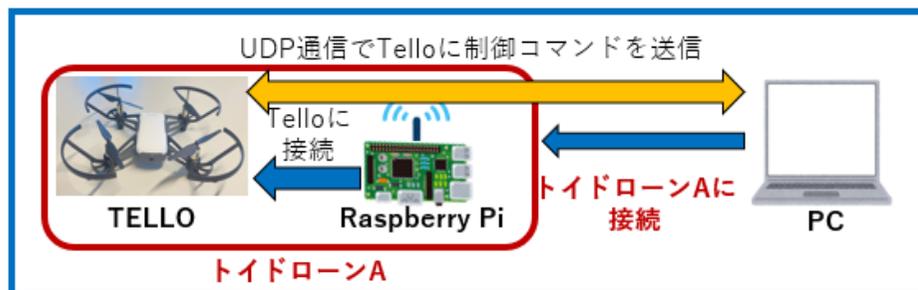


図2 ハードウェア構成

(i) Tello

本稿で用いる DJI 社のトイドローンである。飛行制御に Wi-Fi 接続を用いており、Raspberry Pi から接続することで飛行制御が可能である。Raspberry Pi から制御コマンド(離陸・上昇・下降・前進・後退・右回り・左回り・着陸)を受け取り、受け取った処理を実行する。なお、仕様上、Tello は、IP アドレスが”192.168.10.1”となるため変更ができないため、図2のように、Raspberry Pi と Tello を1つのトイドローンとして動作させることとする。

(ii) Raspberry Pi 3B+

Tello への制御コマンドの送信、IP アドレスの割り当て、ネットワークの構築、周囲の SSID・電波強度の取得・送信、接続する無線ルータの切り替えの処理に Raspberry Pi 3B+を用いる。取得した電波強度のデータは、制御する PC へ UDP 通信で送信する。

(iii) PC(制御端末)

Raspberry Pi への処理の実行開始命令、Raspberry Pi から受け取った周囲の SSID・電波強度の測定結果を表示し、トイドローンへ制御コマンドを送信するために使用する。

本稿において、トイドローンを制御する Raspberry Pi への処理の実行開始命令は、全て PC から SSH 接続で行うこととする。

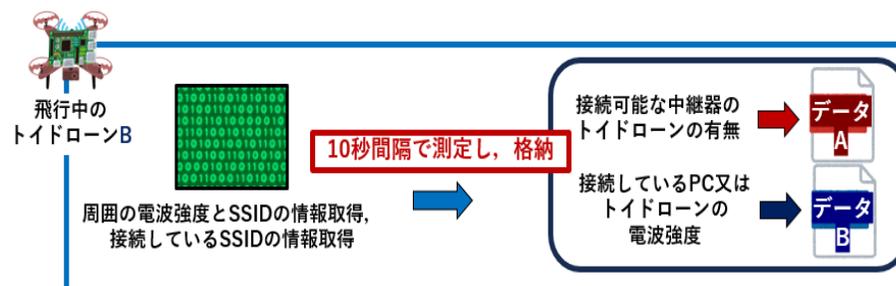


図3 データの格納

4.2 実装した機能の概要電波測定機能

4.2.1 電波測定機能

電波測定機能は、飛行するトイドローンと制御端末(PC)の間や飛行するトイドローンと接続している中継器(異なるトイドローン)との間の電波強度を測定することで、飛行中のトイドローンの制御可能な範囲を判断し、電波強度が閾値を下回ると飛行中のトイドローンは、中継器の役割を担うことに変更するかどうかの判断基準となる機能である。PCは、トイドローンのIPアドレス宛に制御コマンドが送信するために、制御コマンドごとに動作処理ファイルを実行する。動作処理ファイルは、Telloの固定IPアドレス宛に制御コマンドの動作ごとに対応するように個別に用意する。PCに制御コマンドを入力すると、PCからトイドローンにUDPで制御コマンドを送信し、複数の中継器を介してドローンの飛行制御を行う。PCがトイドローンへ離陸の制御コマンドを送信すると、トイドローンは周囲と接続しているPCあるいは中継器となっているトイドローンの電波強度を測定開始する。そして、接続可能で中継機として動作している周囲のトイドローンの有無をデータAに格納し、接続しているPCとトイドローンの電波強度をデータBに格納する(図3)。格納されたデータAとデータBは、トイドローンが接続しているネットワークに対してUDPで各種データをブロードキャストする。データを受信したPCは、受け取った値によって飛行中のトイドローンに対して、以下の二通りの処理を行う。

まず、データAに接続可能な中継器のうち動作中のトイドローンが無く、データBの値が一定以下の値である場合、飛行の継続不可能(電波が弱く飛行可能距離の限界に達する)と判断し、飛行を終了し、中継器として機能するための処理を選択し、役割変更の通知を制御用PCへ送信する。その後、制御用PCから自動的に着陸の制御コ

マンドが送信され、トイドロームは中継器として動作するために中継機能を実行する。

次に、データ A に接続可能で中継器として動作中のトイドロームが有り、データ B の値が一定以下の値である場合、飛行継続可能と判断し、飛行中のトイドロームは、中継器として動作中のトイドロームに接続し、制御用 PC からの制御コマンドは、中継器を通して、飛行中のトイドロームに送信される。なお、データの受け渡しの流れを図 4 に示す。例えば、トイドローム A が中継器として動作している状況で、さらにトイドローム B が中継機能へ移行する際には、トイドローム B に対して PC から多段 SSH 接続を行い、処理を実行する。中継器として動作中のトイドロームは、飛行中のトイドロームから受け取ったデータを制御端末である PC に UDP でブロードキャストを行う形で制御端末の PC に送信する。

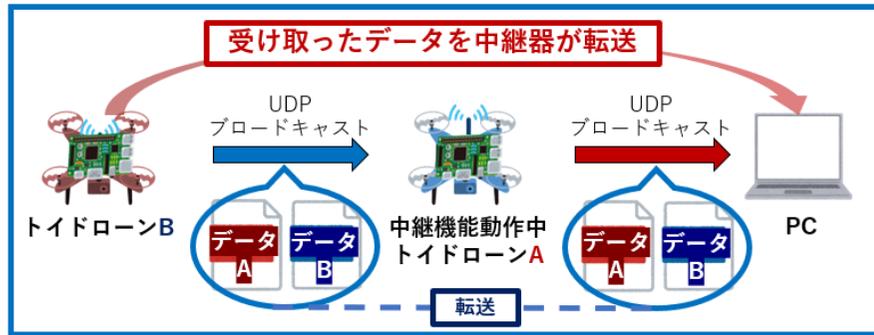


図 4 データの受け渡しの流れ

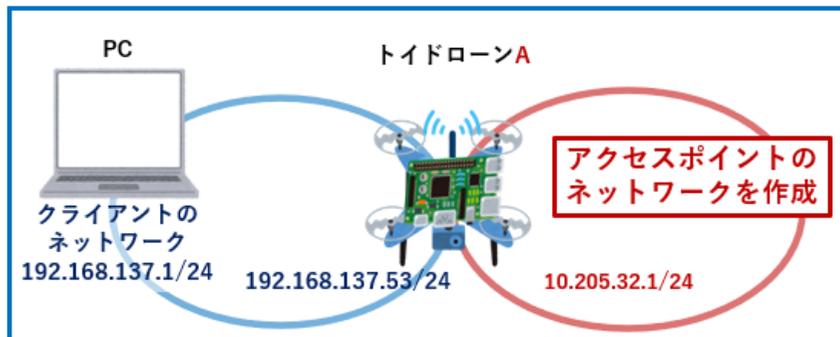


図 5 中継機能のネットワーク構成

4.2.2 中継機能

トイドロームは、中継器としての役割を担うまでは、制御用 PC と直接あるいは中継器が提供するアクセスポイントに接続しながらトイドロームは飛行する。図 5 にトイドロームが中継器として動作する中継機能のネットワーク構成の例を示す。中継機能は、他のトイドロームに接続を行うクライアントとアクセスポイントを同時に行うことで中継器として動作する。これらを同時に行うために、トイドロームが接続されているネットワークに属しながら、別の新たなネットワークへの接続が必要である。

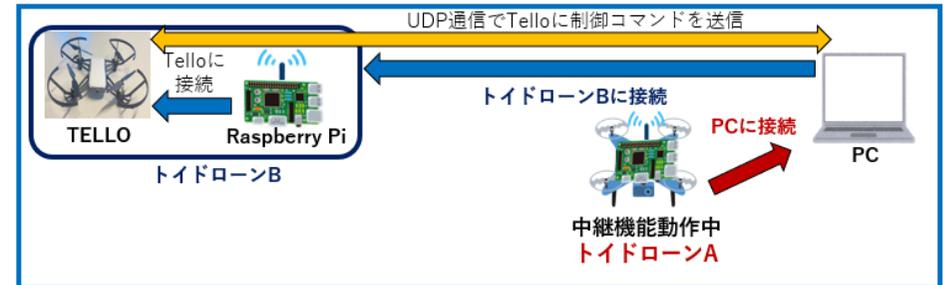


図 6 中継器として動作中のトイドローム待機時の接続構成

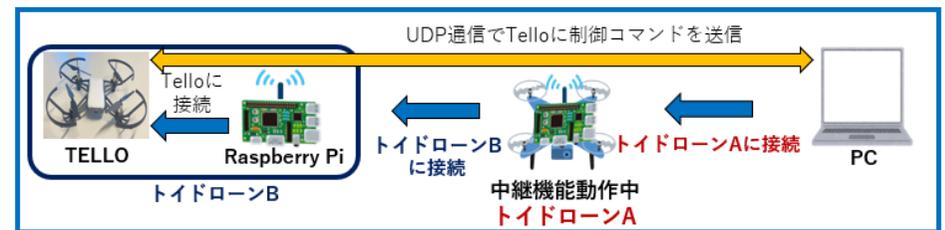


図 7 中継器として動作中のトイドローム利用時の接続構成

図 6 では、トイドローム A が中継器として動作中であり、トイドローム B が制御用 PC によって制御されている例である。ここで、PC は、トイドローム B にクライアント接続し、トイドローム A にアクセスポイントとして接続されている。図 7 は、トイドローム B が中継器として動作しているトイドローム A との接続確立の例である。中継器として動作しているトイドローム A とトイドローム B の接続処理に移行すると、PC からトイドローム B にトイドローム A を介して、多段 SSH 接続を行う。トイドローム B は、新たな仮想インターフェースを作成し、トイドロームの MAC アドレスを

設定する。Raspberry Pi の GUI から Network Manager によって固定の IP アドレスを割り当てる。この際、Hostapd, Dnsmasq が Network Manager の動作に干渉するため動作を停止させる。また、同時に Network Manager を再起動させることで、新たなネットワークが始動し、既に中継機能として動作中のトイドローン A からの接続が可能となる。これらにより、トイドローン A は、トイドローン B にクライアントとして接続が可能とし、また、PC は、アクセスポイントとしてトイドローン A の中継器に接続することで制御コマンドの中継を可能にする。

4.2.3 監視機能

監視機能は、トイドローン同士が飛行ルート上で中継機能が動作しているかを把握する機能である。特に、電波強度の低下やバッテリー残量などにより中継器としての役割を担うことができないトイドローンやトラブル等によって接続不能となったトイドローンを把握するための機能である。本稿において、中継機能として動作するトイドローンは、中継機能を提供する際の IP アドレスをあらかじめ静的に決めている。それらの IP アドレスのリストをテーブルとして管理し、トイドローンが離陸を行うと IP アドレス宛に PC から 20 秒ごとに ping を送信し、死活監視の状況を GUI で表示する。パケットの破損率が 60% 以下でない限り、通信可能と判断する。

5. 予備実験

5.1 予備実験の概要

本提案手法の機能動作の検証を行うために各機能に関する予備実験を行った。本予備実験では、トイドローン A、トイドローン B、PC を利用する。本実験で用いたトイドローンの Tello は、固定 IP アドレスしか持つことができないため、実験時に複数台の Tello を使用すると、中継機能となったトイドローンも飛行中のトイドローンと同時に動作を実行してしまう。そのため、予備実験では、一台の Tello を使用する。そのため、中継器として中継機能動作中のトイドローンとして、中継機能のみを実装した Raspberry Pi を飛行ルート上に配置する形で実験を行った。中継機能動作時、Raspberry Pi には、それぞれ IP アドレスを振り当てる。トイドローン A には、"10.205.32.1" を割り当て、トイドローン B には、"10.205.33.1" を割り当てる。トイドローン制御端末である PC では、ホットスポット機能を利用した。ホットスポット機能では、固定 IP アドレス "192.168.137.1" を割り当てている。

5.2 電波測定機能の予備実験

予備実験として、電波測定機能の動作を確認するために、トイドローン A に中継機能をあらかじめ動作させ、飛行ルート上に設置をした。トイドローン B が PC との電

波強度を測定し、データ B の値（電波強度）が低下すると、データ A に接続可能なトイドローン A が周辺に無いと、中継機能へ移行する。また、データ B の値が低下し、データ A に接続可能な中継機能動作中のトイドローン A を発見すると接続の切り替えを行う。本予備実験では、電波強度の低下と検知する閾値を -20 とした。

電波測定機能の予備実験結果について述べる。トイドローン B が離陸を行うと、電波測定機能が動作し、電波強度を測定できること、そして、トイドローン B から UDP でデータ A、データ B の送受信が可能であることを確認した。電波測定機能によって、トイドローンの飛行中のデータ A、データ B の送受信が行われている様子を図 8 に示す。また、制御用 PC が受け取ったデータを図 9 に示す。



図 8 トイドローン B の電波測定機能の動作例

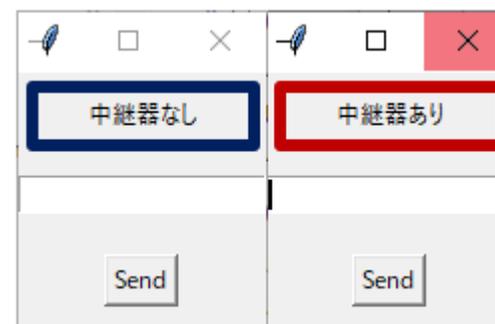


図 9 制御用端末 PC 上で動作する飛行中のドローン周辺の中継器の有無の表示

加えて、中継機能として動作中のトイドローン A の有無の確認実験を行った。電波強度を測定し、測定した値によって処理が変わることを確認した。データ B の値が低下した場合には、データ A に接続可能なトイドローン A が無い場合、中継機能へ移行を開始したこと様子を図 10 に、データ A に接続可能なトイドローン A がある場合、

PC が中継器に接続し、トイドローン B がトイドローン A に接続する処理変化の様子を図 11 に示す。

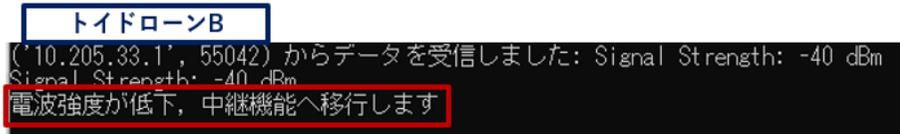


図 10 中継機能移行時の PC 画面

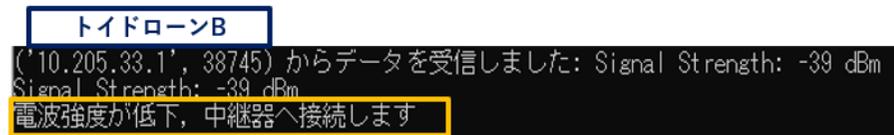


図 11 接続切り替え時の PC 画面

5.3 中継機能の予備実験

中継機能の動作確認実験として、トイドローン A と電波測定機能動作中のトイドローン B を設置する。トイドローン A が、中継機能動作時にアクセスポイント・クライアントとして動作しているかどうかについて確認を行った。

予備実験結果として、図 12 のようにトイドローン B の電波強度の低下によって、着陸が行われると、ネットワークが作成されたことを確認した。また、指定した IP アドレスが割り当てられ、クライアントとしての IP アドレスとアクセスポイントとしての IP アドレスの二つのネットワークに属していることも確認できた。制御用 PC が中継機能動作中のトイドローン A を経由して制御コマンドを送信した場合も、トイドローン B も制御コマンドを受信し、制御可能であることを確認することができた。

5.4 監視機能の予備実験

監視機能の予備実験として、PC、中継機能として動作中のトイドローン A、電波測定機能として動作中のトイドローン B を設置する。中継機能動作時に割り当てられたリストの IP アドレス宛に ping を送信し、各ドローンの死活監視の状況確認を行う。トイドローン B の離陸が行われると、ping の送信が開始されたことを確認した。また、トイドローン A の通信(図 13(a))、トイドローン B 通信(図 13(b))を確認した。さらに、Tello の通信状況(図 14(a))に加えて、中継機能動作中のトイドローン A の動作を停止させると、図 14(b)のように監視機能からトイドローン A、トイドローン B、Tello の

すべてが通信不能であり、中継機能が機能していないことも確認することができた。

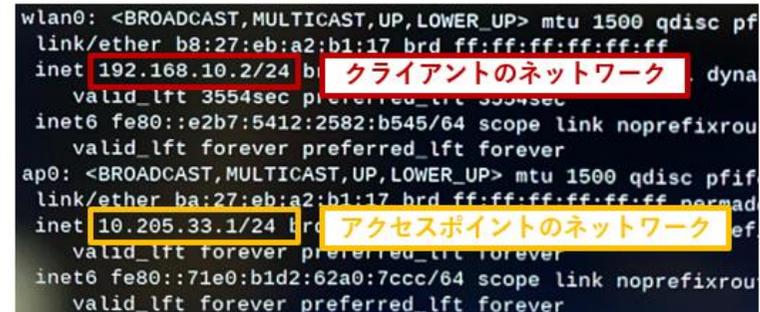


図 12 中継機能動作中のトイドローン B の画面

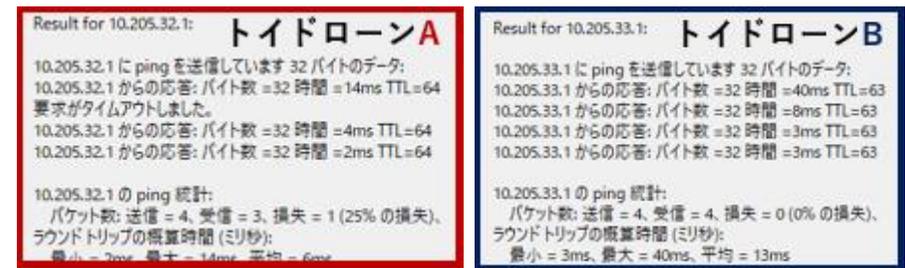


図 13 トイドローン A・B の監視機能の動作実験

おわりに

本稿では、飛行距離や飛行時間に制約のある屋内向けトイドローンの飛行可能距離をドローン同士が中継器となることで飛行可能距離を延ばしながら、広範囲の調査や巡回などの実現を目的とした接続切替制御機能を提案した。そして、トイドローンを使用し、各機能の試作と予備実験により、各機能の動作について確認した。現在の提案手法では、トラブル等で中継機能が停止した場合への対応ができないため、今後は、中継機能として動作しているトイドローンのバッテリー切れや破損などの原因で通信不能となってしまったトイドローンの代わりに新たなトイドローンの中継器として配備するなど、中継器全体が途切れずに長時間使用可能な機能の検討を行う。



(a) Tello 通信可能時

(b) 監視機能による通信不可の様子

図 14 Tello の通信可能状況と通信不可の場合の様子

参考文献

- 1) 三浦龍, 小野文, 加川敏規, 単麟, 松田隆志, 児島史秀, “目視外・見通し外でドローンを運用するための自営型コマンド・テレメトリ通信技術の開発,” 計測と測定, No. 60, Vol. 4, pp.291-295, Apr. 2021.
- 2) 三浦龍, 小野文枝, 加川敏規, 単麟, 児島史秀, 久利敏明, 鈴木陽一, “災害現場等でのドローンの活動範囲を広げるための無線通信技術,” 日本ロボット学会誌 2020, Vol.38, No.3, pp.253-256, Apr. 2020.
- 3) NICT ワイヤレスネットワーク研究センター, “無人航空機関連の通信技術電波が直接届かない場所に「コマンドホッパー」&お互いの位置を把握して衝突回避「ドローンマッパー®」,” パーチャル展示室, https://www2.nict.go.jp/wireless/i_drone.html (参照:2024/01/23)
- 4) 山岸航平, 鈴木剛, “移動無線中継ノードを用いた通信範囲拡大アルゴリズム,” ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2017 巻, pp.1P2-H05(1)- 1P2-H05(3), May 2017.
- 5) 建部尚紀, 服部聖彦, 加川敏規, 大和田泰伯, 浜口清, 高玉圭樹, “受信電波強度を用いた効率的な自律ロボット群展開制御による無線通信網構築,” 計測自動制御学会論文集, 第 52 巻, 第 3 号, pp. 160-171, 2016.