

# 風車ブレードのダウンコンダクタ断線点検のための ドローン半自律飛行システムの開発

Development of a semi-autonomous drone flight system  
for inspection of down-conductor disconnection of wind turbine blades

電子・機械技術部 ロボット・制御科 吉田英一、機械・加工科 菅野雄大  
南相馬技術支援センター 機械加工ロボット科 三浦勝吏  
委託企業 株式会社福島三技協

風力発電用風車の落雷対策用接地線の断線点検用ドローンの実用化に向け、レーザ測距センサを使用し、ドローンから風車タワーまでの距離を一定に保つ機能及びカメラ画像からブレードをAIで検出し、ブレード先端付近まで接近する機能を備えた半自律飛行システムを開発した。委託企業が作製したドローンにシステムを搭載して風車で実証実験を行い、半自律飛行できることを確認した。

Key words: ドローン、半自律飛行システム

## 1. 緒言

風力発電システムの増加や風車の大型化に伴い、落雷による被害が増加している。風車に落雷すると、雷電流はブレード先端付近の受雷部（以降、レセプタという）からダウンコンダクタと呼ばれる接地線を通じて地中に流れるが、ダウンコンダクタが断線した状態で被雷すると電流を地中に流せず、ブレードの破損や飛散事故につながる。そのため、定期的にダウンコンダクタの断線点検を行う必要があるが、現在の点検方法ではロープワークで人がレセプタまで近づいて導通チェックを行うなどの高所作業が必要となっており、危険を伴うことが問題となっている。

委託企業はより安全な断線点検を実現するため、点検用ドローンの開発を行っており、熟練した操縦者が導通チェック用プローブを搭載した点検用ドローンを目視で手動操縦し、ブレード先端のレセプタにプローブを接触させて断線点検できることを実証した。ドローンによる点検イメージを図1に示す。しかし、熟練したドローン操縦者以外でも点検が可能となるよう、風車に衝突せずに安全に飛行でき、レセプタに確実にプローブを接触させることができる飛行システムの実現が強く求められている。

そこで本研究ではドローンによる断線点検の実用化を目指して、点検用ドローンがレーザ測距センサ（以降、LiDAR という）により風車タワーまでの距離を一定に保ちながら自律飛行した後、ある一定の高度からカメラによりブレードをAI認識してブレード直下付近まで接近する自律飛行システムの開発を行った。また、目標位置を維持して安定した飛行をするにはGNSS精度が重要なため、RTK 搭載、非搭載ドローンのホバ

リング安定性を比較した。

本研究は令和5年度地域復興実用化開発等促進事業（ロボット・ドローン分野）の採択テーマ「ドローンを使った大型風力発電用ブレードに内装されている雷対策用接地線の断線点検実用化開発」の一部として、委託を受けて実施した。

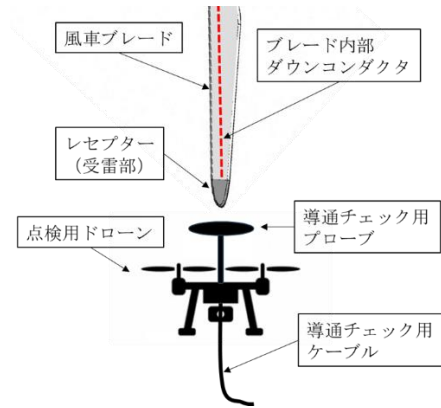


図1 ドローンによる点検イメージ

## 2. 実験

### 2. 1. 半自律飛行実験の概要

実証実験は国立研究開発法人産業技術総合研究所福島再生可能エネルギー研究所（以降、FREA という）に設置されている風車を用いて行った。この風車は定格出力300[kW]、ハブ高さが41.5[m]、3枚翼で1枚あたりのブレード長が16[m]で、ブレード1枚を真下に向けた際のブレード先端のレセプタまでの地上からの高さは約25.5[m]である。

実験に使用した委託企業作製のドローン機体の外観を図2、スペックを表1に示す。



図2 飛行実験用ドローン

表1 ドローン機体のスペック

メーカー	五百部商事 (有)
サイズ(W×D×H)	1050mm×900mm×600mm
最大離陸重量	20kg
飛行時間	最大30分
ペイロード	10kg
バッテリー容量	12000mWh×2

## 2. 2. 半自律飛行のシステム構成

図3に半自律飛行のシステム構成図を示す。

ドローン機体にはPixhawk系フライトコントローラ Cube オレンジを搭載し、オープンソースの飛行制御ソフトウェアPX4を動作させた。

昨年度は飛行制御ソフトウェアにArduPilotを使用した。委託企業がより安定した飛行が可能なPX4搭載ドローンを採用することになったため、PX4向けに変更した。コンパニオンPCは昨年度同様 NVIDIA Jetson Nanoを搭載し、風車タワー検出用のLiDARセンサーと風車ブレード検出用のカメラをUSBポートに接続した。LiDARセンサーは、Slamtec社製 RPLIDAR A3を用いた。カメラはlogicool社製C920nを用いた。

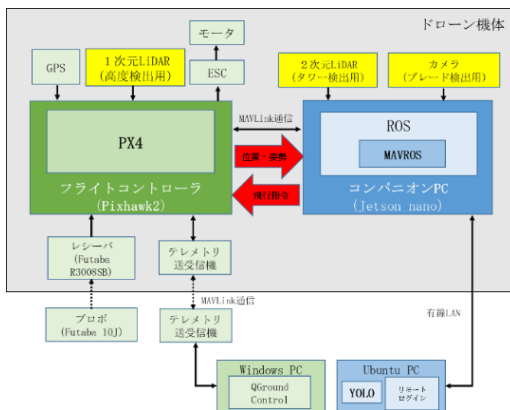


図3 半自律飛行システムの構成図

PX4はArduPilotと同じくテレメトリ通信にMAVLinkというメッセージングプロトコルを使用する。コンパニオンPCでロボットオペレーティングシステム<sup>1)</sup>(以降、ROSという)のパッケージであるMAVRos<sup>2)</sup>を動作させ、コンパニオンPCで作成した飛行制御の指令値を

フライトコントローラに送信した。PX4には手動飛行モードと自律飛行モードのフライトモードがあり、プロポのスイッチに各フライトモードを割り当てて切り替えを行った。

コンパニオンPCと地上に設置したUbuntu PCを有線LANケーブルで接続し、コンパニオンPCから送信されたカメラ画像をUbuntu PC側でAI認識処理し、処理結果をコンパニオンPCに戻す分散処理を行った。これにより、計算負荷の大きなAI認識をリアルタイムに処理できるようにした。また、高度を検出するため1次元LiDARを下向きに設置した。

## 2. 3. 半自律飛行の制御手法

### 2. 3. 1. LiDARによるタワー検出と飛行制御

LiDARによりドローンから風車タワーまでの距離を一定に保つ手法は、令和4年度に開発した手法を用いた<sup>3)</sup>。図4に風車タワーの検出方法の概略を示す。

また、図4中に使用した座標軸を示す。ここで、原点はLiDARであり、z軸は鉛直上向きが正方向である。LiDARで測距したタワーの点群データの座標値から重心 $G(x, y)$ を求め、ドローンから重心 $G$ までの距離 $D$ が一定となるように、x軸方向の速度 $V_x$ を制御した。また、重心 $G$ がx軸上に位置するようにするため、角 $\theta$ が $0[^\circ]$ となるように、y軸方向の速度 $V_y$ を制御した。

なお、地上付近では、タワー以外の物体をLiDARで検出する可能性が高いため、高度2.5[m]以下では飛行制御が働かないようにした。また、風車付近の建物やドローンのプロペラ等の機体部品が測距データに含まれないように、測距距離1.5[m]以下、及び、15[m]以上の測距データは除外した。

飛行速度の制御方法にはPID制御を用いた。ドロー

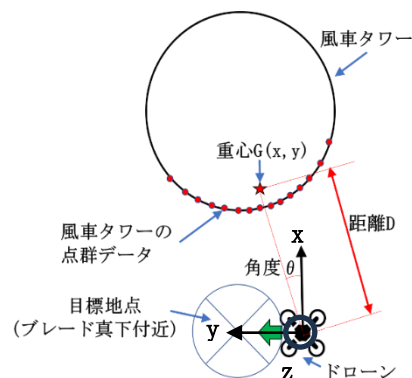


図4 風車タワー検出方法

ンの上昇・下降飛行は、上述のLiDARを使用した距離を一定に保つ制御を行いつつ、Logicool社製のF710コントローラを使用し、手動で操作した。

### 2. 3. 2. カメラによるブレード検出と飛行制御

風車ブレード先端への飛行制御は令和4年度に開発した手法を用いた<sup>3)</sup>。この手法はリアルタイム物体検出 AI システムである YOLO<sup>4) 5)</sup> により風車ブレードを検出し、常に風車ブレードがカメラ画像の中心に映るように ROS によってドローンを操作する。風車ブレードへの飛行制御方法には PD 制御を用いた。

また、YOLO と ROS による飛行制御が正しく動作するかシミュレーションにより確認した。シミュレーションは ROS で動作する 3D モデルのバーチャルシミュレータである GAZEBO を使い、ドローンの飛行を模擬した環境<sup>6)</sup> を使用した。図5のようにシミュレータ環境内に赤い円柱を目標物として追加し、AI が目標物を検出し、目標物がカメラの中心に映るように飛行制御できているか検証した。

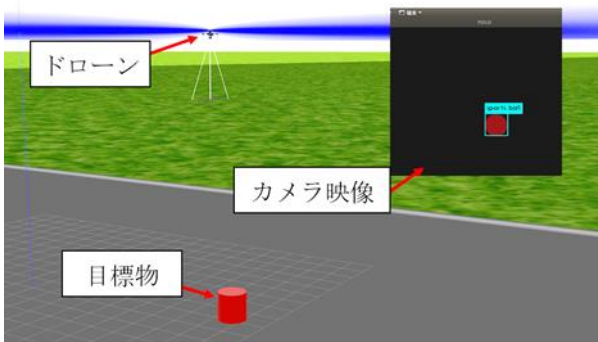


図5 シミュレータによる動作検証の様子

## 2. 4. 実証実験

実証実験の手順は、手動飛行モードの Stabilized モードでの離陸及び一定の高さまでの上昇、GNSS 情報を使用する飛行モードである Position モードでのホバリング、自律飛行モードである Offboard モードでの開発飛行プログラムによる飛行制御検証、Position モードでの着陸とした。

### 2. 4. 1. LiDAR によるタワー検出と飛行制御

図6のように風車タワーから約 10[m]離れた位置(x 方向に-10[m]、y 方向に-1[m])から Stabilized モードでドローンを高度約 8[m]まで上昇させた。次に、Position モードに切り替え、ホバリングした状態から、Offboard モードにより、LiDAR を使用したタワーとの距離を一定に保つ開発プログラムを実行し、タワーとの距離を 8[m]に保つことが可能か検証した。



図6 LiDAR を使用した実験時の様子

### 2. 4. 2. カメラによるブレード検出と飛行制御

実際に風車ブレードを点検する際は、点検するブレードを真下に向けて固定し、ドローンを風車の下から徐々に上昇させ、ブレードに近づける。そこで、カメラを z 軸方向に向け、風車ブレードを検出し、風車ブレードの真下を保つように飛行することを想定している。今回の実験では安全のため、ブレードの真下ではなく、風車タワーから約 10[m]離れた距離を飛行するようにカメラの向きを調整して実験を行った。ドローンを約 10[m]の高さまで上昇させたところで Offboard モードに切り替え、AI による自律飛行制御実験を行った。

### 2. 4. 3. GNSS センサによるドローン飛行精度評価

ドローンで風車ブレードを点検するときには、プローブを風車ブレードに接触させる必要があるため、上下左右ぶれずに安定して飛行することが重要である。安定的に飛行させる方法の1つとして、GNSS センサの精度向上があげられる。

ここでは、より高精度に GNSS 信号を受信できる RTK 測位が可能なドローンと RTK 非対応のドローンをそれぞれ 2 分間 Position モードで約 10[m]の高さでホバリング飛行させ、飛行の安定性を評価した。実験はそれぞれ 3 回ずつ行い、すべて合わせたときの x 軸、y 軸、z 軸それぞれの位置の標準偏差を求めた。

## 3. 結果

### 3. 1. LiDAR によるタワー検出と飛行制御

風車タワーの検出結果を図7に示す。点群データの表示には、ROS で使用されるセンサデータを可視化するツールである RViz を用いた。図7 (a)は、風車タワーの中心位置がドローン前方の x 軸上から y 方向に離れた際の点群データである。点群データが円弧状となっており、タワー形状を捉えていると思われる。一方で、図7 (b)は、ドローン前方の x 軸上にタワーの中心が位置した際の点群データであるが、円弧状の点群データ

となっていない。原因として、図6のようにLiDARとタワーとの間にGNSSアンテナがあるため、反射の影響によりずれが生じたと考えられる。今回の重心を求める計算には影響が無かったため、このセンサの配置で実験を行った。

図8に飛行制御時の機体からタワーまでの距離データを示す。制御開始後、目標値の8[m]到達時から制御終了時までの区間において、目標値との絶対値誤差の平均値は0.33[m]、距離データの標準偏差は0.43[m]であった。LiDARを使用した飛行制御により、タワーからの距離が約9[m]の地点から目標の8[m]の地点まで移動し、距離を一定に保つことができた。しかし、制御開始時は8[m]に到達後、時間40~55秒にかけて、一旦、タワーから距離が遠ざかる動きが見られた。図9に図4の角度データを示す。制御開始後、角度が0[°]に推移することを確認した。しかし、実験開始から60秒後付近で約20[°]、90秒後付近で約45[°]の外れ値が見られた。

図10に飛行制御時の機体の高度を示す。図10のように、LiDARによる自律飛行で距離を一定に保ちながら、リモコンスティックの上下の操作で、機体の高度を変更できることを確認した。

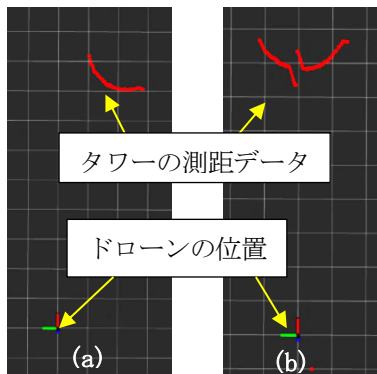


図7 風車タワーの点群データの可視化

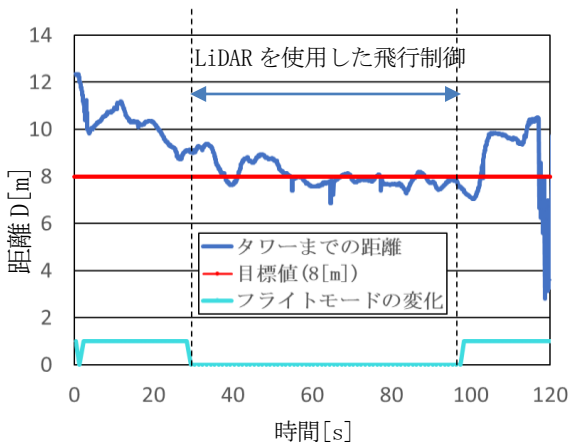


図8 飛行制御時の機体からタワーまでの距離

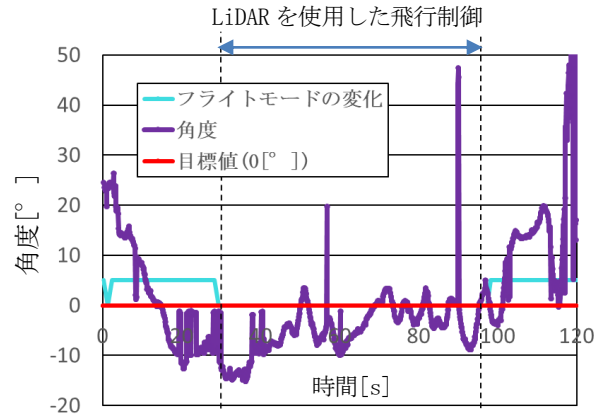


図9 飛行制御時の角度

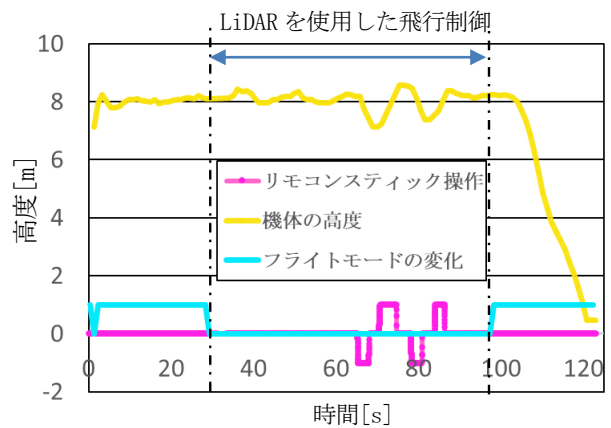


図10 飛行制御時の機体の高度

### 3. 2. カメラによるブレード検出と飛行制御

YOLOとROSによる飛行制御をシミュレーションした時の、カメラ視野内における目標物座標の推移を図11に示す。また、ドローンの座標軸を図12に示す。この座標軸はドローンに搭載しているフライトコントローラを原点としている。結果から、カメラ視野中央付近に目標物が映るように動作することを確認した。

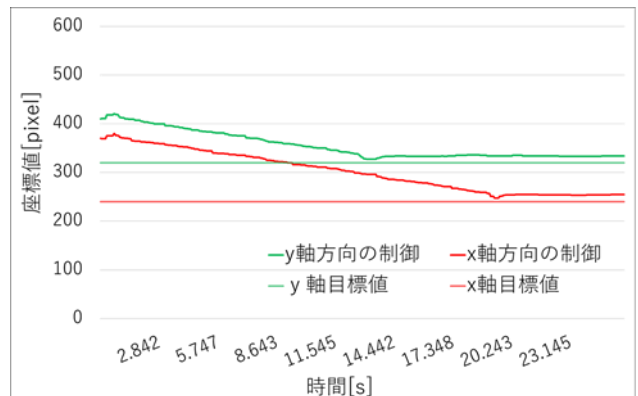


図11 制御結果

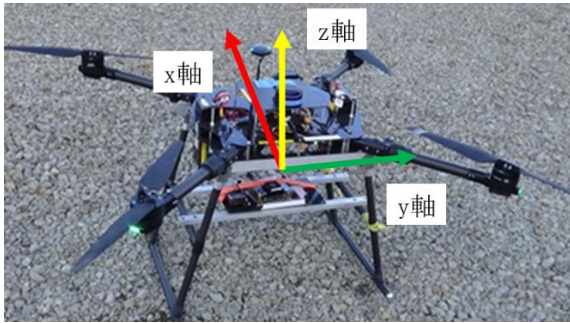


図 1 2 ドローンの座標軸

シミュレーションの結果をふまえて実証試験を行った。実験当時の環境は晴れ、平均風速 10[m/s]であった。

YOLO による風車ブレード中心の検出結果を図 1 3 に示す。また、x 軸、y 軸それぞれの飛行制御の結果を図 1 4 に示す。

y 軸方向は目標点付近で飛行しているが、x 軸方向は目標点を外れた付近で飛行する結果となった。

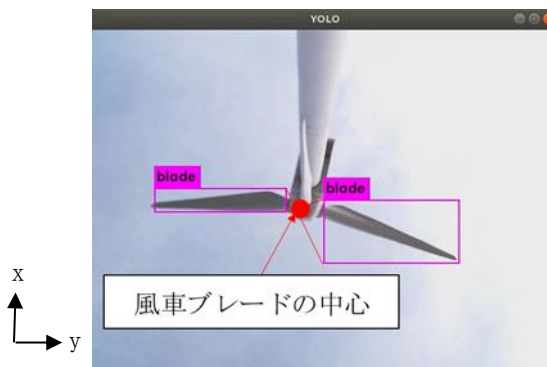


図 1 3 YOLO による風車ブレードの検出

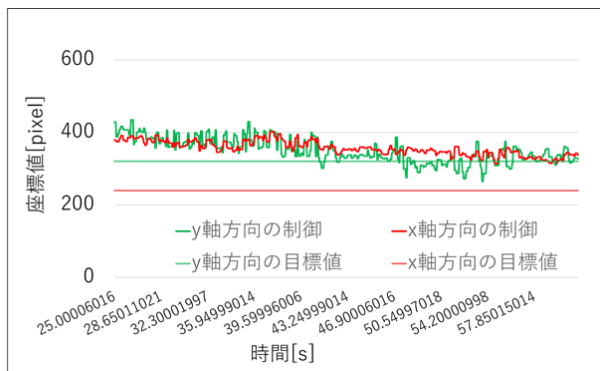


図 1 4 自律飛行制御結果

### 3. 3. GNSS センサによるドローンの飛行精度評価

ホバリング飛行させたときのそれぞれのドローンの軌跡を図 1 5 に示す。この軌跡は 3 回飛行したうちのそれぞれ 1 回目に飛行した時の軌跡である。また、x 軸、y 軸、z 軸それぞれの位置の標準偏差を表 2 に示す。実験当時の環境は晴れ、平均風速 1[m/s]であった。

RTK 測位非対応のドローンの標準偏差が十数cmに対して、RTK 測位したドローンは標準偏差が数cmであった。このことから、RTK 測位非対応のドローンよりも RTK 測位したドローンの方が安定して飛行できることが分かった。

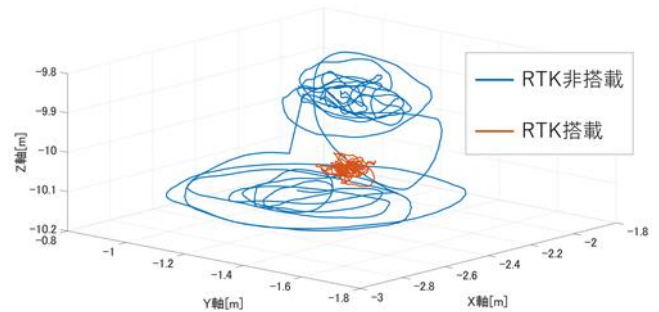


図 1 5 ドローンの軌跡

表 2 飛行時の評価結果

	各軸方向の標準偏差[m]		
	x軸	y軸	z軸
RTK搭載ドローン	0.034	0.031	0.017
RTK非搭載ドローン	0.225	0.147	0.091

## 4. 考察

LiDAR によるタワー検出と飛行制御の実験では、制御を開始してから目標の 8[m] に到達後にタワーから遠ざかる動きがあった。原因として、実験当時、マイナス x 軸方向に風が吹いていたため、タワーから遠ざかるように風に押し切られたと考えられる。図 1 6 に、別の機体ではあるが、風が風速 1~2[m/s] と弱い別日に行った飛行実験の結果を示す。図のように、安定して目標距離を一定に保つ飛行制御が可能であることを確認した。今後は風速何メートルまで制御手法が適用可能か検証する必要がある。

また、図 9 の外れ値については、その際の LiDAR の測距データに外れ値が含まれていたことから、原因として、タワー以外の障害物を測距したことが考えられる。今回の実験では、タワー以外を測距した時間は 0.1 秒から数秒と短時間であったため飛行制御に影響が出なかったと思われる。測距距離を制限するプログラムを修正し、実験時に記録した LiDAR の測距データで重心位置を再計算したところ、外れ値が無いことを確認した。今後、このような測距データの外れ値に対する他の対策として、制御を開始する際の高度をより

高くし、タワー以外の障害物を測距しないようにする方法や、測距した点群データにおいて、円弧形状を検出するデータ処理を行うことで、タワー以外の障害物のデータを除く方法が考えられる。

カメラによる飛行制御実験にて、x 軸方向の結果が目標座標から離れてしまった要因として、実験当時、マイナス x 軸方向に風が吹いていたため、目標座標に進もうとしても風に押し切られてしまったためだと考えられる。同じ制御手法で、シミュレーションや別の機体ではあるが風が弱い別日に飛行実験を行ったところ目標座標付近まで自律飛行できることを確認した。今後は風速何メートルまで制御手法が適用可能か検証する必要がある。

GNSS センサによる飛行精度について、LiDAR やカメラによる飛行制御の実証実験では RTK 非搭載のドローンを使用したが、RTK 搭載のドローンの方が安定して飛行していることが分かった。ドローンに搭載するプローブの直径が 50[cm]であるため、水平方向 (xy 平面) では、直径 30[cm]以内で安定していることが求められている。また、z 軸方向についてはアームが 50[cm]の範囲で上昇・下降ができるので 50[cm]以内で安定していることが求められる。標準偏差の結果を見ると RTK 非搭載でも求められる安定性をクリアしているが、風速によっては求められる値をクリアできない可能性もあるため、より安定した RTK 搭載ドローンを使用した方が良いと考えられる。

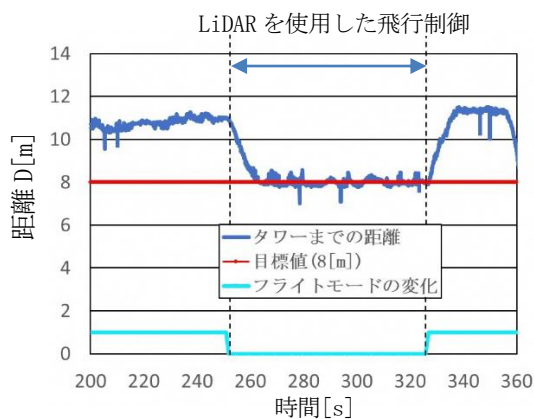


図 16 機体からタワーまでの距離 (風速 1~2[m/s])

## 5. 結言

風車のダウンコンダクタ断線点検用ドローンの実用化に向けて半自律飛行システムを開発し、委託企業が作製したドローンにシステムやセンサ類を搭載して風車で実証実験を行った。

その結果、LiDARセンサによりドローンから風車タワーまでの距離を一定に保つ飛行や、AIでブレードを検出してブレード先端付近まで接近する飛行を行う半

自律飛行ができることを確認した。さらに、データ取得時の留意点や課題 (風の影響) が明らかとなった。

半自律飛行システムの実証試験の結果、風の影響が少ない弱風の場合、LiDARやAI認識により目標位置への飛行制御ができることが分かった。また、RTK搭載ドローンで目標位置を維持しながら安定したホバリングができることが分かった。今回の実験結果を基に、今後は実用化に向けて委託企業の技術支援を行っていく予定である。

## 参考文献

- 1) “ROS.org | Powering the world's robots”. Open Source Robotics Foundation. <http://www.ros.org/>, (参照 2022-1-17). <https://github.com/pjreddie/darknet>. (参照 2022-1-17).
- 2) 吉田樹立, 他. “構造物の点検・補修を目指した吹付ドローンのための半自律飛行”. 日本ロボット学会誌, Vol.39 No.8, pp.759~762, 2021.
- 3) 吉田英一, 他. “風車ブレードのダウンコンダクタ断線点検のためのドローン半自律飛行システムの開発”. 福島県ハイテクプラザ試験研究報告書, 2023.
- 4) Joseph Redmon. “YOLO:Real-Time Object Detection”. <https://pjreddie.com/darknet/yolo/>, (参照 2022-1-17).
- 5) J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick and A.F. Arhadi. “You only look once: Unified, real-time object detection”. arXiv preprint arXiv:1506.02640, 2015. データ(2022.5.19 提供)
- 6) GitHub. “Intelligent-Quads/iq\_sim”. [https://github.com/Intelligent-Quads/iq\\_sim](https://github.com/Intelligent-Quads/iq_sim), (参照 2024-1-25).