洋上風力発電のO&Mコストを低減する 点検省力化技術

Labor-Saving Inspection Technologies for Reduction of Operation and Maintenance Costs at Offshore Wind Farms

菅沼 直孝 SUGANUMA Naotaka 上田 隆司 UEDA Takashi 馬場 敬行 BABA Takayuki

2050年のカーボンニュートラル実現に向け、再生可能エネルギーの主力電源の一つである洋上風力発電の導入拡大が求められている。大量導入のためには、風力発電施設のコストの30%超を占めるO&M(運用・メンテナンス)の省力化が必要である。

東芝エネルギーシステムズ(株)は、O&Mの省力化に貢献する、ドローンによる風車の外観点検の自動化技術、及び遠隔アクセス装置による風車ナセル^(注1)内部の遠隔点検技術を開発した。ドローンによる風車の外観点検の自動化技術に関しては陸上風車において有効性を実証し、ナセル内部の遠隔点検に関しては作業を省力化する基本技術の有効性を確認した。

More offshore wind farms than ever before are being built as a major renewable energy source with the goal of achieving carbon neutrality by 2050. For mass introduction of offshore wind farms to succeed, labor-saving technologies are essential to reducing operation and maintenance (O&M) costs, which account for more than 30% of the total operating costs.

To rectify this, Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation has developed the following labor-saving inspection technologies for offshore wind farms: (1) technology to automatically inspect the exterior of wind turbines using drones equipped with a camera, and (2) technology to remotely inspect the interior of wind turbine nacelles using remote access devices. We have confirmed the effectiveness of the former technology through demonstration experiments using onshore wind turbines as well as the basic functionality of the latter technology.

1. まえがき

洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会による洋上風力産業ビジョン(第1次)⁽¹⁾に、2040年までに浮体式も含む3,000~4,500万kWという洋上風力発電の導入目標が掲げられている。目標達成のために、変化が多い地形が広がる日本の周辺海域に適した浮体式洋上風車の大量導入が期待されているが、低コスト化が課題となっている。特に、コストの30%超を占めるO&Mの省力化技術の確立が求められている。

そこで東芝エネルギーシステムズ(株)は、気象・海象の条件により作業員のタイムリーな現場対応が困難な点検作業をロボット・ドローンで代替し、O&Mに掛かるコストを低減する省力化技術を開発した。風車の外観点検は、ドローンを用いた自動化で作業員のアクセス回数や作業工数を低減する。風車ナセル内部の点検は、通常時の機器点検やアラーム発報時の状態確認をナセル内部に配備した遠隔アクセス装置を用いて遠隔地から実施し、風車の運転停止時間を短縮する。更に、エネルギーシステム向けIoT (Internet of Things)プラットフォームであるTOSHIBA SPINEX for Energy⁽²⁾上で、点検で取得したデータを運転データや風況データなどと一緒に一元管理し、データ分析や可視化をす

ることでO&M業務を効率化する。

ここでは、ドローンによる風車外観点検の自動化技術・ 遠隔アクセス装置によるナセル内部点検技術の概要,及び データの監視分析システムについて述べる。

2. ドローンによる風車外観点検の自動化

ドローンによる風車外観点検の自動化には、次の二つの 課題がある。

点検時に風車を静止させる必要があるが、風車ブレード の角度とナセルの向きを任意の状態で静止させることはでき ない。そのため、ドローンの飛行経路をあらかじめ設定でき ず、点検前に風車の位置と姿勢を推定する必要がある。

また,風や波浪の影響により浮体が動揺するため,点検対象のブレードの揺れにドローンが追従して点検する必要がある。ドローンポート(浮体上や,ナセル,無人船などのドローンの離着陸場所)も同様に動揺する環境であり,追従しながら着陸することが求められる。

これらの課題に対応するため、ドローンにカメラを搭載し、 撮影した風車画像から風車の位置と姿勢(風車の角度、ブレードの角度、及びナセルの向き)を推定する機能、及び 動揺する風車やドローンポートに追従するドローンの制御機

(注1) タワー最上部に位置し、発電機などを収容する筐体(きょうたい)。

①風車静止	②飛行開始	③風車位置・ 姿勢推定	④経路補正	⑤画像撮影	⑥飛行終了	⑦分析•管理
+t/L	ドローンポート	ナセルの向き ブレードの 角度 風車の位置	ブレード 点検経路	動揺追従飛行	追従着陸データ送信	分析(異常検知)

図1. ドローンによる風車の外観点検プロセス

全ての点検プロセスを自動化し、遠隔地からの点検指示と結果確認を可能にする。

Overall processes to automatically inspect exterior of wind turbine using drone

能を開発し、図1に示す風車の外観点検プロセスを自動化し た。以降では、開発した各機能と試験結果について述べる。

2.1 風車の位置と姿勢の推定

ドローンの飛行経路を静止した状態の風車に合わせて補 正するために、ドローンに搭載したカメラで風車を俯瞰(ふ かん)し、撮影した画像から風車の位置と姿勢を推定する 機能を開発した。

ドローンは、離陸後に風車と接触しない経路で風車を俯 瞰できる位置へ移動し、風車の周囲を旋回飛行しながら撮 影する。撮影した画像からタワーやブレードの特徴点を検出 し、風車の寸法情報から事前に作成した3次元モデルと合 わせる最適化計算を解くことで、風車の位置と姿勢を推定 する。また, 旋回飛行中に逐次推定し, 複数地点の推定 結果を統合することで精度を高める。

図2に、陸上風車における実証試験の様子と、風車の位 置と姿勢の推定結果を示す。ドローンの飛行経路の補正に 影響するブレードの静止角度やナセルの向きの角度誤差を、 数度に抑えられることを確認した。

2.2 動揺する風車への追従制御

ドローンは風車の位置と姿勢の推定に基づいて補正した

飛行経路に沿って自動飛行するが、飛行中も風車は動揺す るため、点検画像撮影用のカメラの画角からブレードが外れ てしまう可能性がある。そのため、ドローンは風車の動揺に 追従してブレードとの位置関係を保持しなければならない。

そこで、ドローンに周囲との3次元距離情報を取得する3 次元レーザー距離センサーを搭載し、ブレードの位置を検 出することで飛行経路を補正しながら追従する機能を開発し た。更に、点検画像撮影用のカメラの向きをジンバル機構 で制御し、ブレードを常に画角内に収めるようにした。

15 MW級風車の1/3スケールのブレード先端部を模擬し た試験体を用いて1方向の動揺を再現し、ドローンとジンバ ル機構の追従機能を評価した結果、ドローンは模擬ブレー ドの動揺に少し遅れながら追従し、ジンバル機構によるカメ ラの向きの制御との組み合わせにより、カメラの画角から外 れることなくブレードを撮影できることを確認した(図3)。

2.3 ドローンポートへの追従着陸

点検を終えたドローンが帰還する場所であるドローンポー トは動揺の影響により移動するため、ドローンの帰還時には 離陸時とは異なる位置となる。更に、ドローンの着陸動作 中もドローンポートは動揺する。このため、ドローンポート



白線:推定した風車の 位置と姿勢

(a) 実証試験の様子

(b) 推定結果

図2. 風車の位置と姿勢推定のための旋回飛行と推定結果

旋回飛行は風車の位置と姿勢結果が得られた時点で終了し、ドローンは点 検開始位置に移動する。

Drone circling for estimation of wind turbine position and attitude



図3. 動揺する模擬ブレードに対する追従試験

ブレード位置を3次元レーザー距離センサーで検出し、ドローンによる追従 の遅れをカメラの向きの制御で補う。

Testing of drone follow-up control for swaying simulated blade

側にカメラを配置し、ドローンの底面に取り付けた拡張現実 (AR)マーカー (パターン画像)を読み取ることで、ドローンの位置と姿勢を座標情報として検出し、ドローンを誘導する機能を開発した。

ドローンとドローンポートは通信により座標情報を共有し、 ドローンは着陸目標位置を更新しながら動揺に追従して着 陸する。15 MW級風車の並進方向の動揺を模擬したドロー ンポートを用いて評価試験を実施し、動揺するドローンポートに追従しながら着陸できることを確認した(図4)。

2.4 陸上風車における実証試験

陸上風車において、ドローンによる風車の外観点検プロセスの実証試験を実施した。ブレードの静止角度、及びナセルの向きは未知とし、陸上風車のため風車は動揺しないが、風車への追従制御機能を実装した状態で自動飛行を行った。その結果、飛行経路に沿ったブレードの点検画像を取得することに成功した(図5)。

3. 遠隔アクセス装置によるナセル内部点検

ナセル内の定期点検やアラーム発報時の点検は、主軸や





図4. 動揺するドローンポートに対する追従着陸

誘導用カメラの画角からARマーカーが外れた場合、ドローンは上空で待機 して再検出後に追従着陸を再開する。

Autonomous drone landing on simulated swaying port



図5. 陸上風車における実証試験

図1に示した風車の外観点検プロセスの②飛行開始から⑥飛行終了まで を,全自動で実証した。

Demonstration tests using onshore wind turbine

補機の異常振動や異常音の有無の確認, 設置機器からの 漏油・漏水の確認, 及び電気盤内の目視確認が主な項目 である。これらの作業を陸地からの操作で行うことを想定し た遠隔アクセス装置を開発した。

主軸受けで発電機回転子を支持するドライブトレインタイプの風車を対象とし、点検する機器に応じて遠隔アクセス装置の構成を検討した(図6)。ドライブトレイン部の点検向けに、発電機回転子シャフト内側の壁面に電磁石で吸着固定して壁面の振動を加速度センサーで計測可能な吸着ユニット付きドローンを開発した。また、ナセル内機器の電気系の点検向けに、電気盤を開閉して内部の点検などが可能な移動作業アームを開発した。

3.1 吸着ユニット付きドローン

吸着ユニット付きドローンの外観を**図7**に示す。ドローンのフレームに電磁石と加速度センサーで構成される吸着ユニットを設けており、吸着ユニットを壁面に押し付けるようにドローンを飛行させる。電磁石による壁面への吸着固定後は飛行を停止し、計測時は加速度センサーをドローンから切り離して対象箇所の振動を測定する。ドローンを遠隔操縦して、飛行・壁面吸着・加速度センサー設置・再飛行の一連の動作ができることを、検証試験で確認した。

3.2 移動作業アーム

ナセル内の移動と電気盤の開閉作業などの作業を両立するために、移動作業アームは4輪型の移動ロボットの上に作業アームを搭載する構成とした。点検のためのカメラ、指向性マイクや、サーモグラフィーのほか、作業時の反力を検出するための6軸力センサーなども搭載した。移動作業アームの遠隔操作には、移動ロボットを操作しやすいゲームパッ

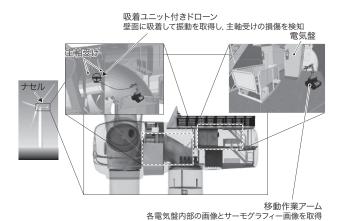


図6. ナセルの点検機器と遠隔アクセス装置

発電機周辺は床面が少ないためドローンでアクセスし、床面のある電気盤 周辺は移動ロボットでアクセスする。

Nacelle inspection devices and remote access device

ドと、作業アーム側で発生した反力を操作者に提示可能なアーム型遠隔操作デバイスを用いており、直感的な操作が可能である。また、作業アームの姿勢をリアルタイム表示できる3次元シミュレーター上に仮想的なガイドを設置し、作業アームの先端部とガイドの接触を3次元シミュレーター内で判定し、扉の開閉動作をアシストする機能を開発した(図8)。接触した場合は、ガイド表面の法線方向の反力を操作者に提示することで、ガイドの形状に沿って扉を開閉できる。

移動作業アームを遠隔操作して電気盤の扉を開閉し,カメラや,作業アームで把持したサーモグラフィーで電気盤の



図7. 吸着ユニット付きドローン

測定時は加速度センサーを単体で壁面に固定するので、ドローン本体や吸着ユニットは測定結果に影響を及ぼさない。

Drone attached to adsorption unit for nacelle inspection



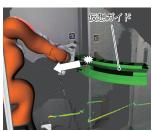




図8. 移動作業アームと遠隔操作デバイス

仮想ガイドに作業アームの先端を押し当てることで, 円弧軌道から外れることなく扉の開閉操作ができる。

Mobile manipulator and remote controller for nacelle inspection

内部を点検する作業の検証を実施し、サーモグラフィーから判定できる異常発熱位置を移動作業アームの位置情報と ひも付けて特定できることを確認した。

4. センシングデータの監視分析システム

TOSHIBA SPINEX for Energyを用いて、点検で取得したセンシングデータを運転・保守データ・風況データなどと一緒に管理して活用する監視分析システムを構築した(図9)。

外観点検ドローンや遠隔アクセス装置で計測した位置の情報にひも付いた画像・振動・音・温度などのセンシングデータに加え、ナセル内部の機器を遠隔監視するために常設したセンサーのデータをTOSHIBA SPINEX for Energy

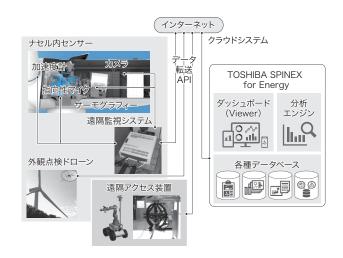


図9. 監視分析システムの構成

センシングデータは、TOSHIBA SPINEX for Energyの共通 API (Application Programming Interface) を用いて、定期的にデータベースに登録する。

Configuration of monitoring and analysis system for offshore wind farms

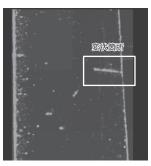


図10. 統合ダッシュボード

異常を検知した際にアラートを表示し、運転・風況データなどの関連情報 を連携表示できる。

Example of integrated dashboard display





入力画像

処理結果

図11. 風車ブレード点検画像のAI分析結果の例

AI分析を活用し、正常なブレードの外観とは異なる変状箇所を提示できる。 Example of wind turbine blade inspection image analyzed by artificial intelligence (AI)

上のデータベースに登録して一元管理できる。また、オンラインでセンシングデータ、運転・保守データ、風況データ、及びアラートを可視化する統合ダッシュボードを備えている(図10)。

図11に示す風車ブレード点検画像のように、センシングデータを機械学習や変状検出AI⁽³⁾などの分析エンジンで処理してダッシュボード上に表示することで、異常有無の判定や変状箇所の特定などの検査作業を省力化できる。

5. あとがき

洋上風力発電のO&Mコストを低減するための省力化技術を開発し、機能・性能を確認した。

今後は、風車外観点検ドローンとナセル内部点検の遠隔 アクセス装置の長期信頼性と耐環境性能を向上させて、洋 上環境における実証を行い、国際競争力のある技術確立を 進めていく。

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) の助成事業 (JPNP21015) の結果、得られたものである。

文 献

- (1) 洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会. 洋上風力産業ビジョン(第1次). 2018, 11p. https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/yojo_furyoku/dl/vision/vision_first.pdf>, (参照 2024-06-14).
- (2) 東芝エネルギーシステムズ、"TOSHIBA SPINEX for Energy"、https://www.global.toshiba/jp/products-solutions/digital-transformation/spinex-for-energy.html, (参照 2024-06-14).
- (3) 東芝. "インフラ点検向けに数枚の正常画像から異常個所を世界最高精度で検出するAIを開発". https://www.global.toshiba/jp/technology/corporate/rdc/rd/topics/22/2205-01.html, (参照 2024-06-14).



菅沼 直孝 SUGANUMA Naotaka 東芝エネルギーシステムズ (株) エネルギーシステム技術開発センター 機械技術開発部 日本ロボット学会会員 Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



上田 隆司 UEDA Takashi 東芝エネルギーシステムズ(株) エネルギーシステム技術開発センター 機械技術開発部 電気学会会員 Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



馬場 敬行 BABA Takayuki 東芝エネルギーシステムズ(株) エネルギーアグリゲーション事業部 風力発電技術部 Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.