

ワイヤ吊り下げロボットの把持機構

中山 恵介* 吉田 英晴** 富田 洋文*

1. はじめに

カーボンニュートラルの実現に向け、国内外で風力発電の導入が進んでいる。しかし、風力発電設備の補修には高所作業が伴うため、作業者の安全性向上が求められ、また人材不足への対応が喫緊の課題である¹⁾。

風力発電設備のブレードは、エロージョンやクラックなどの損傷により、ブレードの折損や落下等の重大事故に繋がるため、定期点検の遵守、早期の補修が重要である²⁾³⁾。

作業者による高所作業に代わる手段として、メンテナンスロボットの研究開発が行われている。LEBO ROBOTICS や AERONES のメンテナンスロボットは、風力発電設備のナセルから吊り下げられ、地上の作業者が操作して、ブレードの点検や補修を行う⁴⁾⁵⁾。しかし、現状の仕様は陸上風力発電設備のメンテナンスを想定している。洋上風力発電設備の場合、高波などの要因で、船による発電設備へのアクセス可否が左右されるため、アクセス性向上が課題となる。

2. 目的

本研究では、洋上風力発電設備の安全な点検、補修作業の省力化を目的とし、ドローンとワイヤ吊り下げロボット（以下、ロボットという）を組み合わせたメンテナンス作業システムの開発に取り組んでいる⁶⁾⁷⁾⁸⁾。ドローンから吊り下げられたロボットがブレード把持状態にて補修及び移動することを想定し、本稿では、ブレード把持機構を提案し、把持力制御、把持の可否及びブレード移動における把持力の変化を検証した。

3. 研究内容

3.1 ロボットの把持機構

3.1.1 システムの概要

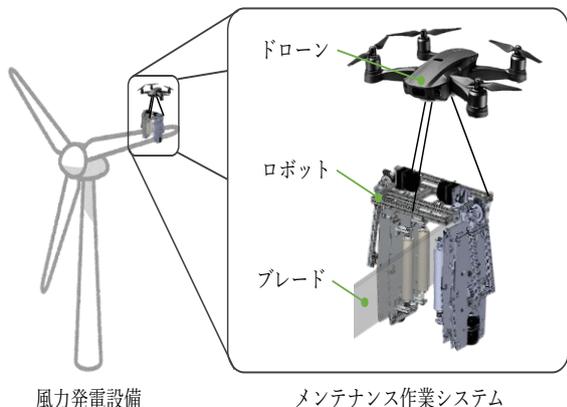


図1 風力発電設備向けメンテナンス作業システム

図1に、風力発電設備向けメンテナンス作業システムの概要を示す。ドローンからロボットをワイヤで吊り下げ、ロボットが風力発電設備のブレードを把持し、

ロボットは自身の位置姿勢を固定した状態で、ブレードを補修する。補修箇所を移動する際は、ロボットは把持状態を維持しながら、車輪回転により移動し、ドローンはロボットの移動に合わせて自律的に移動することを想定している。なお、メンテナンス作業システムはブレード長さ40mの補修作業を想定しているが、本稿では1/3サイズにスケールダウンしたロボットにて検証した。

3.1.2 把持機構の静力学

図2に把持機構ロボットの外観を示す。把持機構は対称な機構であり、片側3自由度を有する。モータ回転による能動関節1自由度にて車輪をブレードに押し当てることで把持動作を行い、軸回転による受動関節2自由度にてブレード形状に追従した把持を行う。把持動作時の反力により、ガイド部がスライドし、ロードセルに押し当てられることで発生する反力を検出し、3.1.3節に記す把持力制御に使用する。ガイド部に取り付けられたコイルばねは、把持動作時の衝撃緩和、ガイド部のこじり抑制を想定している。

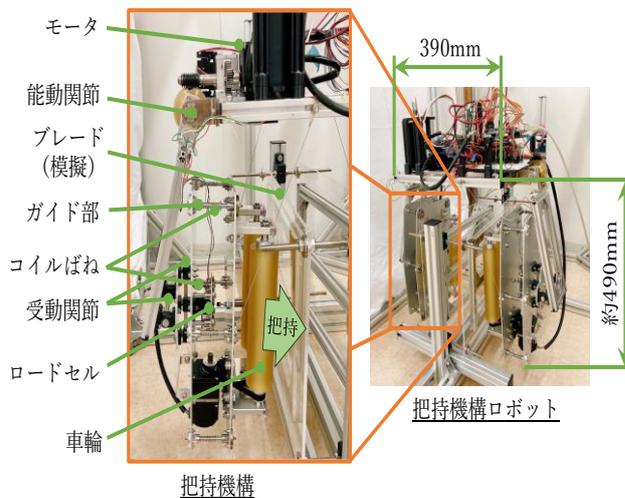


図2 把持機構ロボットの外観

図3に把持機構の模式図を示す。能動関節のモータによるトルク T_L 、 T'_L を入力とし、リンク長 $L_{i(i=1, 2, 3, 4)}$ 、 $L'_{i(i=1, 2, 3, 4)}$ 、関節角度 $\theta_{Lj(j=1, 2, 3)}$ 、 $\theta'_{Lj(j=1, 2, 3)}$ 、ブレード角度 θ_{Bv} 、 θ'_{Bv} 、 θ_{Bh} 、 θ'_{Bh} を用いて静力学を解くことにより、押付力 F_2 、 F'_2 が求められる。なお、押付力によりガイド部がスライドし、ロードセルにて検出される反力を本稿では把持力 F_1 、 F'_1 とし、押付力 F_2 、 F'_2 と釣り合い、それらを式(1)、(2)に示す。式(1)、(2)は3.5.1節の考察においても使用する。

$$F_2 = F_1 =$$

$$\frac{T_L \cos \theta_{Bh}}{\sqrt{L_1^2 + L_2^2 + (L_3 + L_4)^2 + 2(L_3 + L_4)(L_2 \sin(\theta_{L1} + \theta_{Bv})) + L_1 \cos(\theta_{L1} + \theta_{Bv})}} \quad (1)$$

* IT・マテリアルグループ **研究推進グループ

$$F'_2 = F'_1 =$$

$$\frac{T'_L \cos \theta'_{Bh}}{\sqrt{L'_1{}^2 + L'_2{}^2 + (L'_3 + L'_4)^2 + 2(L'_3 + L'_4)(L'_2 \sin(\theta'_{L1} + \theta'_{Bv})) + L'_1 \cos(\theta'_{L1} + \theta'_{Bv})}} \quad (2)$$

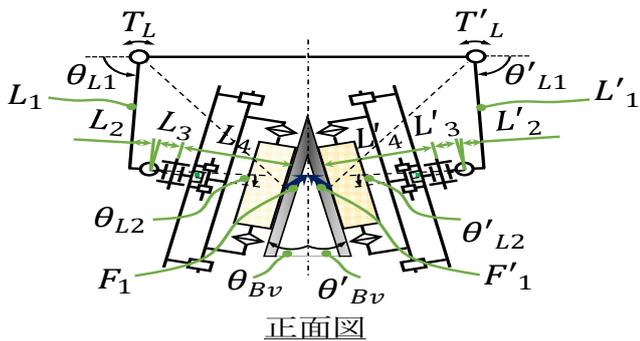
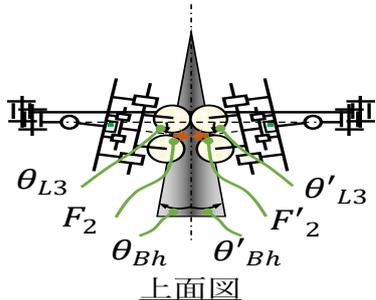


図3 把持機構の模式図

3.1.3 把持力制御

把持力制御に関して、ロードセルにて検出した把持力をフィードバック値とし、能動関節のモータ回転をPID制御する。把持力の誤差を低減し、目標に近づける。PID制御による能動関節のモータへの入力 $u(t)$ は、式(3)により求めた。

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \dot{e}(t) \quad (3)$$

ここで K_p 、 K_i 、 K_d はそれぞれPゲイン、Iゲイン、Dゲイン、 $e(t)$ は把持力の目標値と現在値の誤差を表す。

3.2 把持力制御の簡易評価

3.2.1 検証システムの構成

図4に把持力制御検証システムの全体図を示す。ロボットの把持を簡易的に模擬するため、モータ回転により発生する力をプレートに入力して、ガイド部がスライドし、コイルばねが圧縮されながらロードセルに荷重が入力される構成とした。さらに、把持力制御における荷重変化がロボットの車輪移動に与える影響を簡易的に検証するため、モータ回転によりワイヤを巻き取りしてプレートを移動し、ワイヤと直列に配置したロードセルに荷重が入力される構成とした。

プレート下部には、球状の車輪を使用して床面に接地することで、車輪移動を簡易的に模擬した。なお、これらの検証システムを2組使用することで、図2に示す対称な把持機構を模擬している。

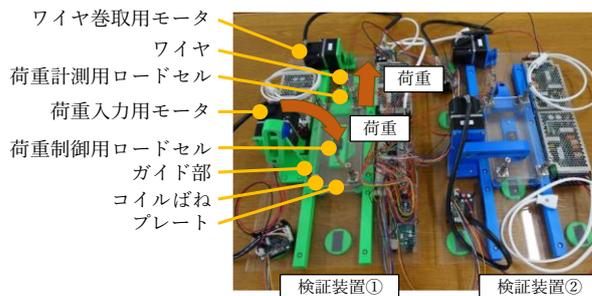


図4 把持力制御検証システムの全体図

3.2.2 把持力制御検証

柔軟な把持を想定し、荷重の目標値を250gf、500gf、750gfの3フェーズに分けて設定し、ロードセルに入力される荷重を制御した。荷重の目標値750gf時にモータでワイヤを巻き取り、荷重変化を計測した。

各荷重制御用ロードセルにおける目標値と押付力の差分は80%未満、荷重計測用ロードセルにおけるワイヤ巻取時の荷重変化は最大105%未満である。

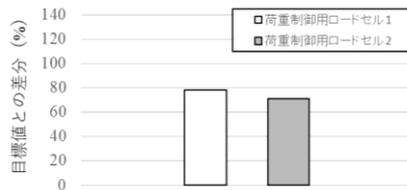


図5 荷重の目標との差分

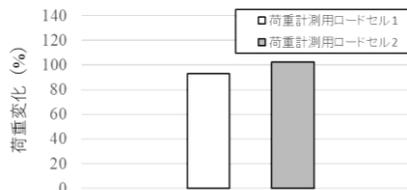


図6 ワイヤ巻取時の荷重変化

3.2.3 把持力制御検証の考察

把持を想定した荷重の目標値との差分

使用したDCブラシレスモータは速度制御であり、目標荷重に近づくと、PID制御によりモータの回転速度がゼロ付近となる。モータの回転速度がゼロに近い状態では、コイルばねの反力によりモータ出力軸が回転して荷重抜けが発生し、さらにばね振動によりロードセルに負荷される荷重も振動したことが影響したと考える。

ワイヤ巻取時の荷重変化

プレートに入力される荷重が振動する影響により、ボール状の車輪と床面の摩擦力が変化し、その状態でワイヤを巻き取り走行することで、ワイヤ巻取時の荷重が変化したと考える。

これらの考察から、把持機構検証システムに使用する把持力制御用のDCブラシレスモータ(3.3.1節に示す能動関節モータ)は、コイルばねの反力により回転しないようなギア比の高いモータを選定した。

3.3 把持機構の評価

3.3.1 把持機構検証システムの構成

図7に把持機構検証システムの構成を示す。ドローンから吊り下げられた状態を模擬するため、固定長のワイヤ3本にてロボットを吊り下げた。また、吊り下げ上端部に1軸の受動スライド機構を設けることで、ロボットの移動に追従して移動するドローンを模擬した。さらに、対向する2枚の亚克力板を用いて取付角度を調整可能することで、3.1.2節に記す4種類のブレード角度 θ_{Bv} 、 θ'_{Bv} 、 θ_{Bh} 、 θ'_{Bh} を変化させた把持検証を可能とした。

図8に把持機構検証システムの構成図を示す。把持力の目標値とPID制御のパラメータをPCのソフトウェアからマイコン (Arduino MEGA 2560) に送信し、マイコン上の制御プログラムに値を設定する。PCのソフトウェアからマイコンに把持動作開始指令を送信すると能動関節のモータが回転し、把持動作が開始する。亚克力板を把持し、把持力の反力によりロードセルに荷重が負荷されると荷重値がマイコンに入力され、把持力の制御が開始する。荷重値はPCのソフトウェアに対しても送信され、10ms周期にてcsv保存される。また、PCのソフトウェアからマイコンに車輪回転開始指令を送信すると車輪のモータが回転し、把持状態の場合は亚克力板を把持しながらロボットがy軸方向に移動する。

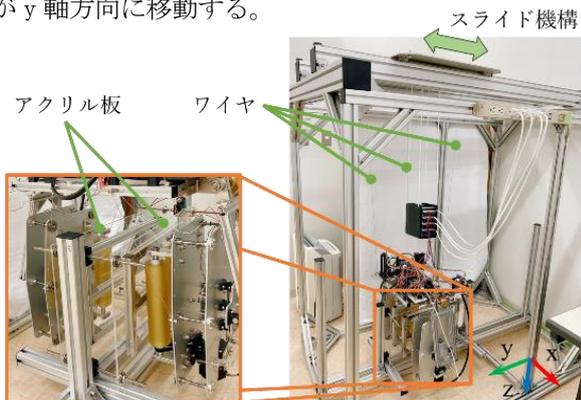


図7 把持機構検証システムの構成

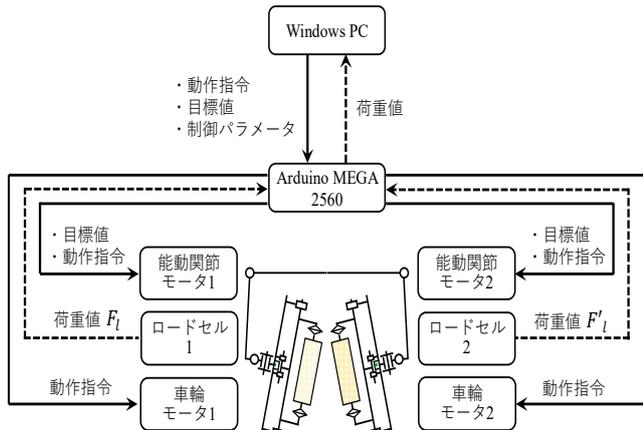


図8 把持機構検証システムの構成図

3.3.2 ブレード把持検証

ブレード角度 θ_{Bv} 、 θ'_{Bv} は0~15deg、 θ_{Bh} 、 θ'_{Bh} は0~3degと想定し、亚克力板を用いて模擬したブレード角度の複数の組合せにて、ブレード把持の可否について検証した。図2に示すように把持機構は対称であることを考慮し、ブレード最小角度と最大角度の組

合せ、かつ冗長性のない組合せとして、表1に示すブレード把持の検証条件を設定した。また、把持力の目標値は、図2に示すコイルばねの作動力以上とするため550gfに設定し、ブレード角度条件ごとに10回把持した。

表1 ブレード把持の検証条件

条件	ブレード角度(deg)			
	θ_{Bh}	θ'_{Bh}	θ_{Bv}	θ'_{Bv}
条件①	0	0	0	0
②	0	0	15	15
③	0	0	0	15
④	3	3	0	0
⑤	3	3	15	15
⑥	3	3	0	15
⑦	0	3	0	0
⑧	0	3	15	15
⑨	0	3	0	15

把持を検証したところ、車輪がブレードに追従せず、車輪端部のみブレードに接触した。Table1に示す条件⑤、⑥、⑧、⑨では車輪軸を支えるブラケットがブレードに干渉した(図9)。

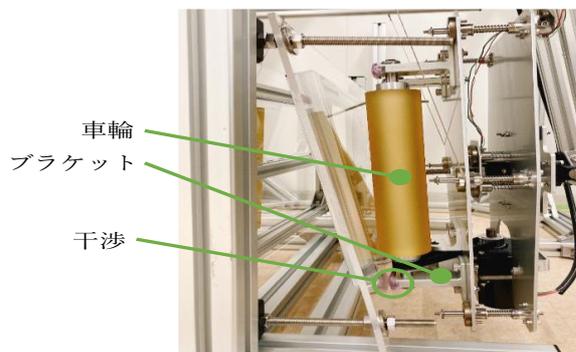


図9 ブラケットとブレードの干渉

部品の干渉が生じなかった条件①~④、⑦において、把持静止状態での把持力の目標値との差分を求め、10回試行の平均値を図10に示す。目標値との差分は各条件10%未満であり、ばらつきを含めると15%未満である。

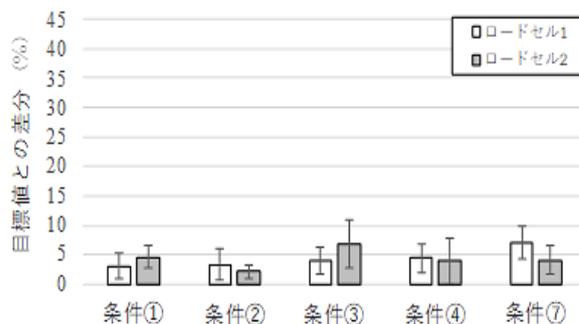


図10 把持力の目標との差分

3.4 ブレード移動における把持力変化検証

目標荷重になるように、把持力を制御しながら車輪を回転させてブレード上を移動することを想定し、移動時の把持力変化について検証した。目標荷重550gfとして10秒間把持力を制御後、把持力を制御しながら車輪を10rpmにて3秒間回転させ、ブレードを把持しながら移動させた。ブレード角度の条件は、把持した

際に部品の干渉が生じなかった条件①～④、⑦にて検証した。移動前と移動中の把持力変化の最大値を求め、10回試行の平均値を図11に示す。把持力変化は各条件25%未満で、ばらつきを含めると35%未満である。

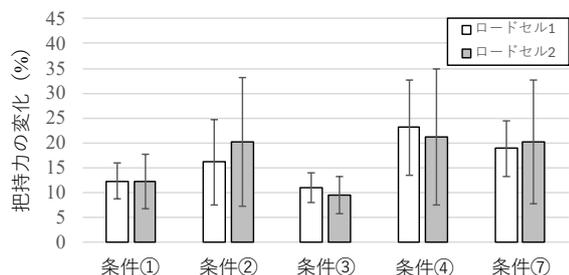


図11 移動前と移動中の把持力変化

3.5 考察

3.5.1 ブレード把持検証の考察

把持動作時に車輪がブレードに追従せず、車輪端部のみブレードに接触した要因は、車輪外周部のウレタン材がブレードに接触した際の摩擦が大きく、車輪の姿勢変化が抑制されたと考えられる。よって、下記A、Bにより、車輪がブレードに追従できると考える。

- A. 車輪にサスペンションを取り付ける。
- B. 車輪の角度を調整する能動関節を追加する。

表1に示す条件⑤、⑥、⑧、⑨において車輪軸を支えるブラケットがブレードに干渉した原因は、車輪がブレードに追従しないと考えられるため、上記A、Bの設計変更が有効と考える。

また、図10に示すように、2つのロードセル荷重に差が見られたが、把持静止状態を保つことができた。3.1.2節の式(1)、(2)に示すようにロードセル荷重 F_1 、 F'_1 にはブレード角度 θ_{Bv} 、 θ'_{Bv} 、 θ_{Bh} 、 θ'_{Bh} が含まれ、ブレード角度 $\theta_{Bv} = \theta'_{Bv}$ かつ $\theta_{Bh} = \theta'_{Bh}$ では $F_1 = F'_1$ 、すなわち $F_2 = F'_2$ となった場合、 F_2 、 F'_2 のベクトルは図3上面図に示す中心軸に対称となり、把持静止が可能となる。しかしブレード角度 $\theta_{Bv} \neq \theta'_{Bv}$ または $\theta_{Bh} \neq \theta'_{Bh}$ では $F_1 \neq F'_1$ 、すなわち $F_2 \neq F'_2$ であり、 F_2 、 F'_2 のベクトルは図3上面図に示す中心軸に対称とならないため、把持静止状態に至らない可能性がある。本検証では、ブレード角度の条件③にて $\theta_{Bv} \neq \theta'_{Bv}$ 、条件⑦にて $\theta_{Bh} \neq \theta'_{Bh}$ であるが、把持静止状態が保たれた。これは、可動部であるガイド部、受動関節の剛性や能動関節におけるウォームギアのセルフロック等により、異なるベクトルの把持力を許容できたと考えられる。

3.5.2 ブレード移動における把持力変化検証の考察

ブレード移動により把持力の変化が生じた要因として、下記の2点が考えられる。

- C. 把持力を調整するPID制御の低応答
 - D. 移動時の揺れに起因する把持力の低下
- Cについては、適切なゲインを設定することで応答性を高められる。Dについては、ロボットの移動に伴いワイヤがスライド機構を引張ることにより、ロボットの移動に遅れてスライド機構が移動し、吊り下げられ

たロボットに揺れが発生する。この揺れにより把持姿勢がずれることで把持力が低下した可能性が考えられる。スライド機構は受動的に移動し、ドローン移動の場合は能動的に移動することを想定しているため、本検証と同様の揺れは発生しない可能性がある。しかし、ドローンとロボットの移動速度や加速度にずれがある場合、揺れが発生し、把持力の低下に繋がる可能性が考えられる。今後、これらの揺れを模擬するため、スライド機構は能動とし、ドローンの移動速度や加速度を模擬した検証を行いたい。

4. まとめと今後の課題

本研究では、ドローンから吊り下げられたロボットがブレード把持状態にて補修することを想定し、ブレード把持機構の提案、把持力制御、把持の可否及びブレード移動における把持力の変化を検証した。

ブレード角度9条件中5条件において把持可能であり、把持力の目標値との差分は各条件10%未満であり、ばらつきを含めると15%未満である。また、ブレード移動における把持力変化は、各条件25%未満であり、ばらつきを含めると35%未満である。今後は、全条件において把持可能とするため、把持機構の設計変更を予定している。また、ブレード移動における把持力変化を低減するため、把持力調整に用いるPID制御のゲイン調整し、さらにドローンを模擬した検証システムを改良し、より実環境に近い検証を実施予定である。

なお、本研究は令和4年度から令和8年度までの文部科学省特別電源所在県科学技術振興事業「次世代メンテナンスビジネスに向けたドローンの高機能化に関する試験研究事業」の一環として実施している。

5. 参考文献等

- 1) スマート保安官民協議会電力安全部会：“電気保安分野スマート保安アクションプラン”、pp.17-18(2021)
- 2) 日本風力開発ジョイントファンド株式会社：“東伯風力発電所4号機ブレード折損事故について”、pp.22(2020)
- 3) 日本風力発電協会：“風力発電設備ブレード点検および補修ガイドライン JWPA G0001-2020”、(2020)
- 4) LEBO ROBOTICS：“ブレードメンテナンスロボ”、<https://www.leborobotics.com/>
- 5) AERONES：“Leading Edge Repair Services”、<https://aerones.com/services/repair/>
- 6) 吉田 英晴：“LiDAR搭載マルチコプターを用いた風力発電設備の位置姿勢推定手法の開発”、第85回全国大会講演論文集、pp.55-56(2023)
- 7) 中山 恵介：“ワイヤ吊り下げロボットの位置姿勢制御”、計測自動制御学会 SI 部門講演会 SICE-SI 予稿集、pp.207-209(2023)
- 8) 吉田 英晴：“LiDAR搭載マルチコプターによる表面メッシュ生成手法”、第86回全国大会講演論文集、pp.77-78(2024)