

ワイヤ吊り下げロボットの研磨機構

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。

図1に風力発電設備向けメンテナンス作業システムを示す。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て、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)~10)}。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、位置姿勢を固定した状態でブレードを補修する。ロボット中央部内側にブレード研磨機構を配置し、ブレード把持状態のままブレードのリーディングエッジを研磨する。補修箇所を移動時は、把持状態を維持したまま車輪駆動によりロボットが移動し、ドローンはその移動に追従して自律移動する想定である。ドローンとロボットを組み合わせたメンテナンス作業システムの実証に向けて、これまでにロボットによるブレード把持の検証を行い、あらゆるブレード角度に対して把持可能であることを確認した⁹⁾。今年度は、ブレードの研磨について検証した結果を報告する。

2. 目的

補修ガイドライン³⁾やブレードメンテナンス業務を行う企業からの聞き取りにより、次の2条件を満たす損傷部を本研究での補修対象とする。

- 1) 塗装剥がれの発生頻度が高い、ブレード先端付近のリーディングエッジ
- 2) 早期補修を想定し、FRP 部の補修を伴わない軽微な塗装剥がれ

補修作業時は、まず塗装剥がれを研磨にて除去することから、本稿では、ブレード研磨機構を提案し、作業者とロボットにおける研磨後の表面粗さを比較することを目的とする。

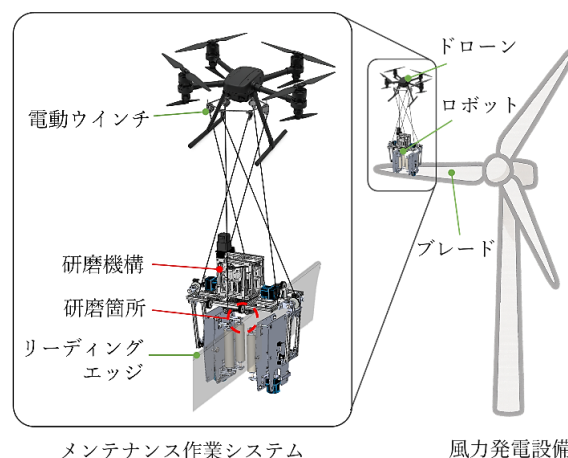


図1 風力発電設備向けメンテナンス作業システム

3. 研究内容

3.1 メンテナンス作業システムの構成

3.1.1 把持機構の構成⁹⁾

図2に把持機構の外観を示す。把持機構は左右対称構成であり、片側3自由度を有する。能動関節（1自由度）のモータ回転により車輪をブレードに押し当てて把持し、受動関節（2自由度）の軸回転によりブレード形状に追従する。把持時の反力に応じてガイド部がスライド（フローティング機構）し、ロードセルに当接して反力を検出、これを把持力制御に用いる。ガイド部に取り付けたコイルばねは、把持動作時の衝撃緩和とガイド部のこじり抑制を目的とする。

把持力制御について、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。

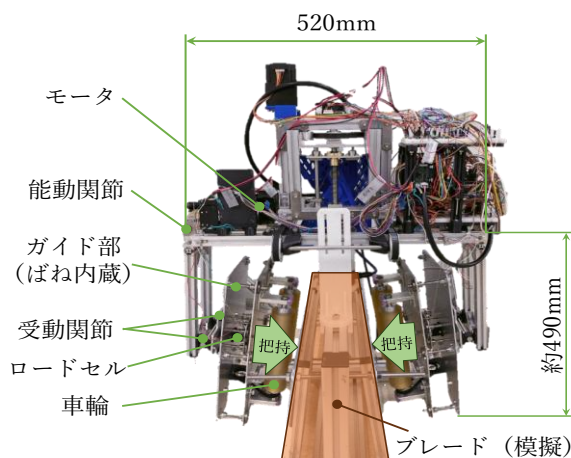


図2 把持機構の外観

3.1.2 研磨機構の構成

図3に研磨機構の外観を示す。研磨機構は研磨回転部と研磨移動部からなり、いずれも3本の回転軸を有

* IT・マテリアルグループ **研究推進グループ

する。各回転軸の外周には研磨ベルトおよびタイミングベルトを取り付ける。1本の軸をモータで駆動すると残りの2本が受動的に回転し、これにより研磨ベルトとタイミングベルトが回転する。タイミングベルトの回転は台形ねじを介して研磨移動部に伝達され、同部が直動して研磨ベルトをブレードに押し付け、研磨を行う。

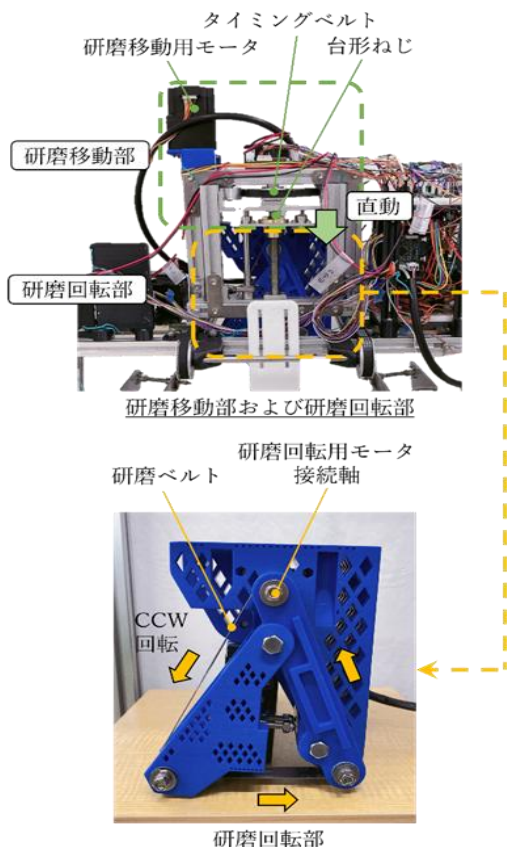


図3 研磨機構の外観

3.1.3 研磨押付力制御

ブレード研磨はダブルアクションサンダーを用いた手作業により、荷重は約 2,000gf 以下の低荷重で実施されている。3.1.1 節の把持機構のようにフローティング機構の反力をロードセルで検出して研磨押付力を制御する場合、フローティング機構の自重を上回る荷重域でなければ反力検出が困難であり、低荷重域での研磨に課題がある。そこで本研究では、ロードセルを使用せず、研磨ベルト回転用モータの電流値をフィードバック量として用いる研磨押付力制御を採用する。

研磨ベルトの回転には速度制御型 DC ブラシレスモータ (Plexmotion, CBA-30CKF-SB) を用いる。回転中の研磨ベルトをブレードに押し付けると研磨抵抗が生じ、速度一定制御が補償トルクを増加させて回転数を維持するため、それに伴いモータ電流値が増加すると仮定する。モータに入力される直流電流を電流センサ((株)秋月電子通商, AE-LT6105)で検出し、センサ出力電圧を電流値に換算してフィードバック値とする。このフィードバック値を用い、研磨押付用ステッピングモータ (Plexmotion, CSB-UK56D1-SB) の回転を PID 制御し、電流値の誤差を低減して目標値に近づける。なお、3.2.3 節に示す方法により、目標とする研磨押付力に対応付けられたモータ電流の目標値を推定し、PID 制御で使用する。PID 制御による研磨押付用モータへの

入力 $u_p(t)$ は、式(1)により求めた。

$$u_p(t) = K_{p2}e_p(t) + K_{i2}\int_0^t e_p(\tau)d\tau + K_{d2}\dot{e}_p(t) \quad (1)$$

ここで K_{p2} 、 K_{i2} 、 K_{d2} はそれぞれ P ゲイン、I ゲイン、D ゲイン、 $e_p(t)$ は電流値 (研磨押付力に対応) の目標値と現在値の誤差を表す。

3.2 研磨機構の評価に向けた事前検証

3.2.1 作業による研磨の表面粗さ

手作業によるブレード補修を想定した研磨後表面粗さを確認するため、作業による検証実験を実施した。研磨紙 (粒度 #120、 $\phi 125\text{mm}$) を貼り付けたダブルアクションサンダーを使用し、ブレードのリーディングエッジ研磨を模擬するために、硬質ポリ塩化ビニル管 (長さ 80mm) の稜線を研磨対象とし、10本の試料を研磨した。なお、本稿では1回の研磨ごとに研磨紙を新品に交換した。表面粗さの測定には触針式表面粗さ輪郭形状測定機 (AMETEK (株)、フォームタリサーフ PGI 1240 型) を用い、硬質ポリ塩化ビニル管の稜線を長手方向に触針で走査した。3.2.5 節に示すロボットによる研磨結果と比較するため、測定長さは同一の 17mm とし、ISO 4287:1997 に基づいて表面粗さを算出した。なお、ロボット研磨^{11) 12)}の評価指標として用いられる算術平均粗さ R_a および最大高さ粗さ R_z を本稿においても評価指標として採用した。

その結果、10本の試料における研磨後の R_a の平均値 $5.50\mu\text{m}$ 、 R_z の平均値 $60.0\mu\text{m}$ を確認した。なお、カットオフ $\lambda_c=8\text{mm}$ としたが、測定長さの制約により評価長さは $1 \times \lambda_c$ として表面粗さを解析したため、本稿では R_{a1} 、 R_{z1} と表記する。表面粗さ解析では、信頼性の観点から評価長さを $5 \times \lambda_c$ とすることが推奨されるが、本試験では測定長さの制約上、 $1 \times \lambda_c$ により評価した。

3.2.2 研磨機構検証システムの構成

図4に研磨機構検証システムの外観を示す。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本でロボットを懸架した。把持対象は対向する2枚の亚克力板とし、取付角度を 7.5deg に設定することでブレード角度を模擬した。研磨機構における研磨ベルトは粒度 #120、幅 20mm、長さ 520mm を使用した。研磨対象は硬質ポリ塩化ビニル管 (長さ 80mm) とし、ブレードのリーディングエッジを模擬した。硬質ポリ塩化ビニル管の下部に力覚センサ ((株) ワコーテック, WGF-3M50-5-RG5) を取り付け、3.2.3 節で述べる研磨押付力に対応するモータ電流の推定に用いた。

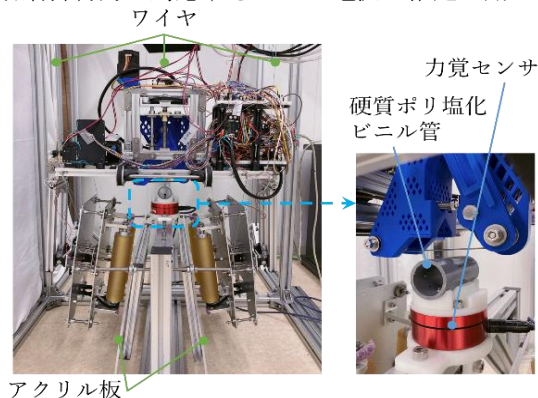


図4 研磨機構検証システムの外観

図 5 に研磨機構検証システムの構成図を示す。把持力、研磨押付力（電流値換算）の目標値と PID 制御のパラメータを PC 上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設定する。PC 上のソフトウェアからマイコンに動作開始指令を送信するとモータが回転して把持および研磨を開始する。把持力、研磨押付力はマイコンから PC 上のソフトウェアに送信され、csv 形式で保存される。

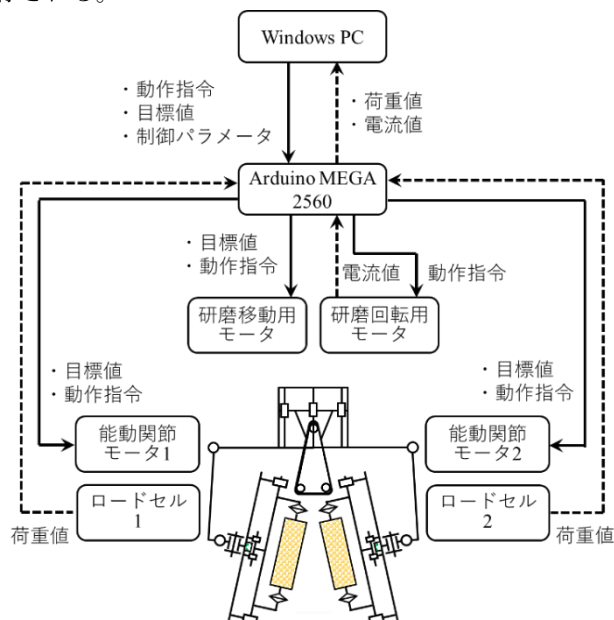


図5 研磨機構検証システムの構成図

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 に設定した。研磨押付力の目標値は、作業者の押付圧力と同等を目指し、研磨紙φ125mm にて長さ 80mm の硬質ポリ塩化ビニル管稜線を押し付けた時の稜線長さ 80mm に対する圧力と、研磨ベルト（幅 20mm）で押し付けた時の稜線長さ 20mm に対する圧力が等しくなるよう、ロボットの研磨押付力 F_{robot} 、作業者の研磨押付力 F_{hand} とすると、

$$F_{robot} = \frac{F_{hand}}{\lambda} \quad (7)$$

と表される。補修作業の研磨押付力 F_{hand} は約 2,000gf 以下で実施されていることから、ロボットの研磨押付力 F_{robot} を 500gf に設定した。研磨ベルト回転用モータの回転数は 300rpm に設定し、3.2.4 節の収束傾向評価に基づき研磨時間を設定した。

3.2.3 研磨押付力に対応する電流値の推定

研磨押付力 500gf に相当する電流値を研磨押付力制御における PID 制御の目標値（設定値）とするため、研磨押付力に対応する電流値を推定した。回転状態の研磨ベルトを硬質ポリ塩化ビニル管に押付け、力覚センサが出力する圧縮方向の荷重（研磨押付力）を 480～520gf の範囲で取得した。この範囲における研磨押付力と対応する電流値の複数測定点に対して最小二乗法を適用し回帰式を導出し、研磨押付力 500gf における電流値を推定した。

図 6 に研磨押付力から推定した電流値を示す。10 回の試行から得た推定電流値の平均は 0.591A であり、以降の 3.3.1 節の検証に使用した。

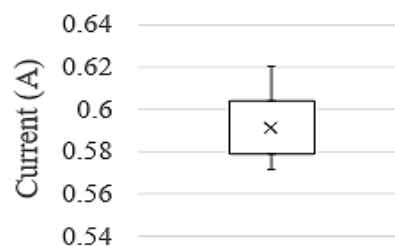
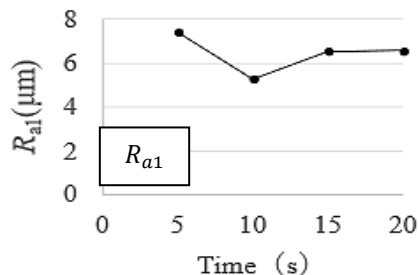


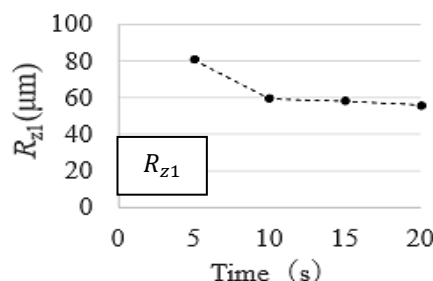
図6 研磨押付力から推定した電流値

3.2.4 研磨時間に伴う表面粗さの収束傾向評価

研磨時間と表面粗さの関係を検証し、収束傾向が確認された研磨時間を 3.3.1 節の検証に用いる。研磨時間を 5、10、15、20s の 4 条件に設定し、硬質ポリ塩化ビニル管を各条件で 1 本ずつ計 4 本研磨した。研磨後における硬質ポリ塩化ビニル管の稜線を表面粗さ輪郭形状測定機の触針で 17mm 走査し、3.2.1 節と同様の評価長さで表面粗さを解析した。図 7 に研磨後の表面粗さ R_{a1} 、 R_{z1} をそれぞれ示す。研磨時間 15s 付近から R_{a1} に収束傾向が見られ、研磨時間 10s 付近から R_{z1} に収束傾向が見られたことから、3.3.1 節の検証に用いる研磨時間を 15s に設定した。



(a) 表面粗さ R_{a1}



(b) 表面粗さ R_{z1}

図7 研磨時間と表面粗さの関係

3.3 研磨機構の評価

3.3.1 ロボットによる研磨の表面粗さ

ロボットによる研磨を以下の手順で実施した。

- 1) 把持力制御により目標荷重付近まで到達させる。
- 2) 把持力制御を解除し、能動関節を駆動するウォームギアのセルフロックにより把持力を保持する。
- 3) 研磨ベルトを空転させた状態で研磨押付力制御を開始し、研磨ベルトが硬質ポリ塩化ビニル管に接触してから 15s 間研磨する。

硬質ポリ塩化ビニル管を 10 本研磨し、3.2.1 節、3.2.4 節と同様の条件で表面粗さを測定・解析した。 R_{a1} の平均は $6.79 \mu\text{m}$ 、 R_{z1} の平均は $58.4 \mu\text{m}$ を確認した。

3.3.2 表面粗さの比較

3.2.1 節および 3.3.1 節で検証した作業者とロボッ

トの研磨による表面粗さの比較を図8(a)、図8(b)に示す。 R_{a1} 、 R_{z1} において、両者は概ね同等の傾向が見られた。

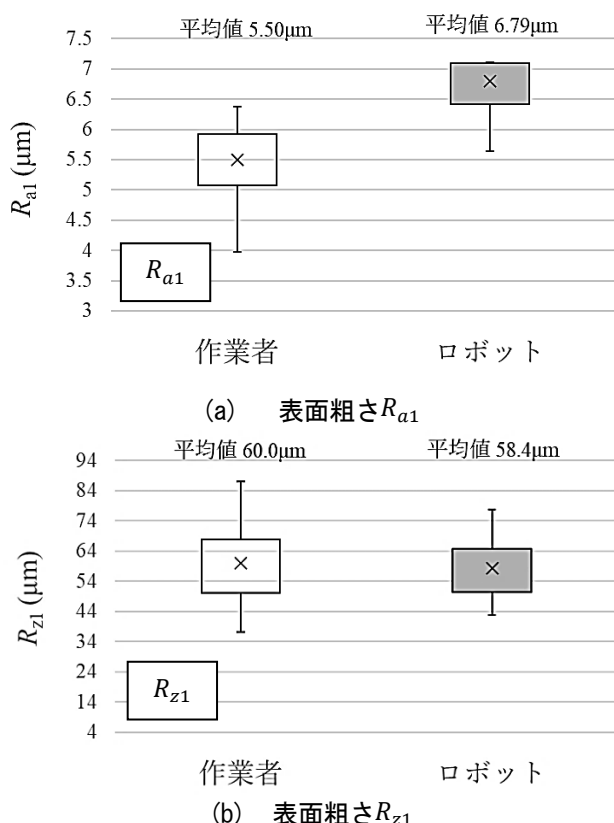


図8 作業者とロボットの研磨による表面粗さの比較

3.4 考察

作業者とロボットによる研磨において R_{a1} 、 R_{z1} は概ね同等の傾向が見られたことについて、両プロセスとも粒度、押付圧力は同等条件としたことに起因すると考える。 R_{a1} 、 R_{z1} のばらつきについて、1)～3)の要因が複合した結果と推察される。

- 1) 接触軌道の違い
ダブルアクションサンダーは把持側シャフト軸とパッド軸が偏心しており、偏心状態で回転により揺動性の複合軌道を描く。一方、ロボットの研磨機構では研磨ベルトが一方方向に連続回転し、長手方向への送りを伴わないため一方方向の軌道となる。この軌道差は研磨痕の配向および周期性に影響し、ばらつきが生じ得る可能性がある。
- 2) 研磨押付力の変動
作業者の研磨では、反力変動に対する感覚フィードバックの遅れや姿勢変化により研磨押付力が変動する。一方、ロボットの研磨機構では、反力変動に対するPID制御の応答遅れにより研磨押付力が変動する。いずれも押付力の微小変動が研磨痕の深さに影響し、ばらつきが生じ得る可能性がある。
- 3) 評価長さが $1 \times \lambda_c$
本稿では測定長さの制約により評価長さは $1 \times \lambda_c$ であった。信頼性の観点から、表面粗さの解析は $5 \times \lambda_c$ を標準とすることが推奨されており、評価長さが短い場合は局所的な表面凹凸に影響され易く、ばらつきが増大する可能性がある。

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たロボットがブレード把持状態で補修する想定の下、ブレード研磨機構を提案し、作業者と研磨後表面粗さを比較したところ、 R_{a1} 、 R_{z1} は概ね同等の傾向が見られた。このことから、軽微な塗装剥がれ除去においてロボット研磨が作業者と同等に研磨し得る可能性が示唆された。今後は、1)～3)を実施し、 R_{a1} 、 R_{z1} のばらつき要因を検証予定である。

- 1) ロボットに長手方向の送りを付加した往復研磨の実装
- 2) 作業者の研磨押付力の測定
- 3) 評価長さ $5 \times \lambda_c$ での表面粗さ解析

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 JWSA G0001-2020”、(2020)
- 4) LEBOTICS：“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)
- 9) 中山 恵介：“ワイヤ吊り下げロボットの把持機構”、計測自動制御学会 SI 部門講演会 SICE-SI 予稿集、pp. 1150-1153 (2024)
- 10) 吉田 英晴：“ドローンと作業ロボット連携のためのウィンチ式リフトの開発”、計測自動制御学会 SI 部門講演会 SICE-SI 予稿集、pp. 302-304 (2024)
- 11) Zhou Zhenfeng, Sun Xu, Yang Yanzhen, Fu Yongjian：“A Study on Using Magnetic Abrasive Finishing with a 6-Axis Robot to Polish the Internal Surface Finishing of Curved Tubes”, Coatings, 13(7):1179 (2023)
- 12) Wang Xinqing, Wang Xin, Yang Zhenyu, Zou Yupeng：“An Investigation of Real-Time Robotic Polishing Motion Planning Using a Dynamical System”, Machines, 12(4):278 (2024)