

## 風力発電設備の補修作業に向けた補修ロボットの開発

中山 恵介\* 吉田 英晴\*\* 富田 洋文\* 平間 毅\*\*

### 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るとともに、人材不足への対応が喫緊の課題となっている。本研究では、安全な補修及び補修作業の省力化を目的とし、ドローンと補修ロボットを組み合わせた簡易補修システムの開発に取り組んでいる。

### 2. 目的

本研究では、風力発電設備の簡易補修システムを開発することを最終目標とし、令和4年度はシステムの構想設計を行った。また、構想の実現に必要な荷重制御技術について予備検討を行った。

### 3. 研究内容

#### 3.1 補修システムの構想設計

補修システムの構想設計にあたり、風力発電事業者及び補修事業者からの聞き取りや文献調査等から、対象とする補修作業として以下を設定した。

- ・補修対象：ブレード先端付近のリーディングエッジにおける軽微な摩耗（塗装剥がれ）
- ・補修範囲：ブレード先端から長さ5m、幅0.2m

設定した条件を基に、図1に示すようなドローンに吊り下げられたロボットが補修作業を行うシステムを考案した。ドローンが補修ロボットに上向きの力を加えて、ブレードにかかる荷重負荷を小さくすることを想定している。しかし、突風やGPS誤差等によりドローンのホバリング位置にズレが発生した場合、ブレードにかかる補修ロボットの荷重負荷が一時的に増え、ブレードの損傷に繋がる可能性がある。そこで、電動ウインチのワイヤ長を自動制御し、ブレードにかかる荷重負荷を一定に保持することを検討した。また、予備検討として荷重を一定に保持する制御アルゴリズムを開発し、評価実験を行った。

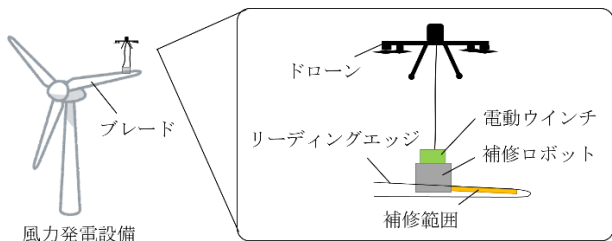


図1 補修システムの概要

### 3.2 吊り下げ時の荷重負荷制御

#### 3.2.1 補修システムを模擬した評価装置の構築

図2に荷重負荷制御を評価するシステムの概要を示

す。ドローンのホバリング位置ズレは、多関節ロボット手先の移動により模擬する。多関節ロボットの手先に、電動ウインチを模擬したモータをテグスで接続し、ブレードを模擬したアルミフレームにかかる荷重負荷（Z軸）を力覚センサにより計測する。モータ回転による巻き取りや巻き戻しによりテグス長が変化し、荷重負荷を調整できる。

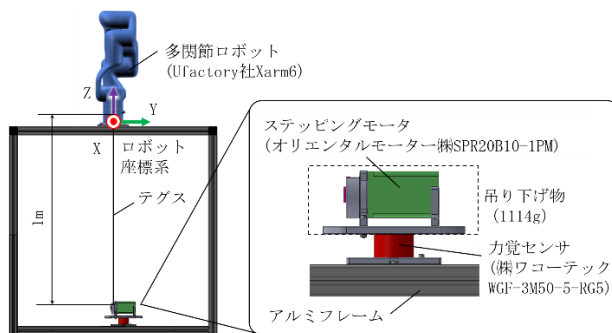


図2 荷重負荷制御評価システムの概要

#### 3.2.2 荷重負荷制御のアルゴリズム

PID制御を用いてモータに与える操作量を自動調整し、目標荷重に到達するような荷重負荷制御を行った。PID制御を組み入れたモータへの入力 $u(t)$ を、式(1)に示す。

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \dot{e}(t) \quad (1)$$

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、 $e(t)$ は目標荷重と現在荷重の誤差を表す。

#### 3.2.3 荷重負荷制御の評価実験

図3に示すように、X、Y、Z軸の各軸でロボット手先をそれぞれ10cm移動させ、荷重負荷制御により荷重負荷を一定に保持可能か検証した。図2に示す吊り下げ物1114gをモータで巻き上げ、力覚センサにかかる荷重が814gになるように制御を行った。

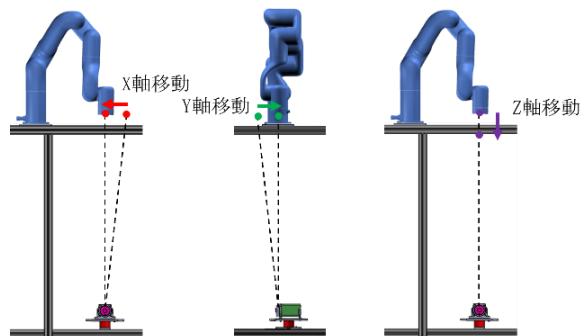


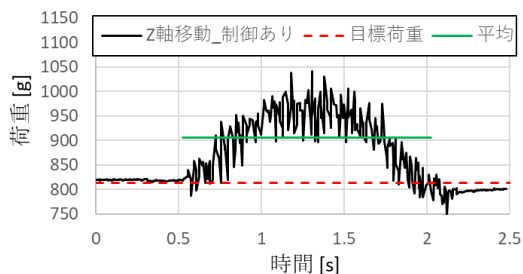
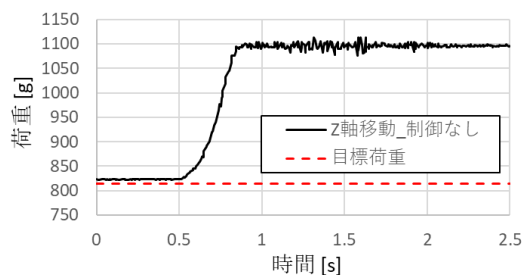
図3 各軸におけるロボット手先の移動方法

制御有無を切り替えた場合のロボット手先移動中における荷重の時間変化を図4に示す。また、各軸における荷重変化の最大値及び荷重変化量を表1に示す。

「制御なし」の荷重変化量を100%とした場合の「制御あり」の荷重変化量は、X、Y軸移動で45%程度、Z軸移動で75%程度であった。

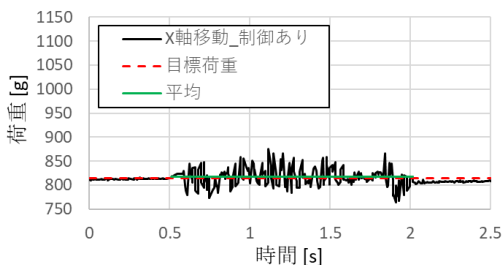
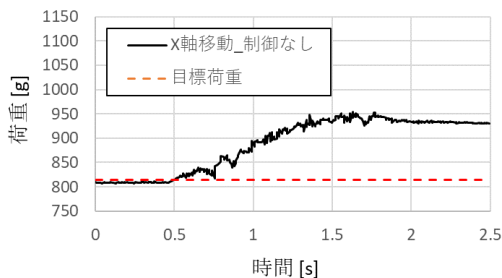
図4(a)、(b)より、X、Y軸移動中の荷重変化の平均は目標荷重に近く、制御により荷重負荷を一定に保持できる可能性が示唆された。荷重変化の振幅が大きい原因として、制御時のモータによる振動の影響が考えられる。より適切なゲイン調整、モータと力覚センサの接続部分に防振材を取り付けるといった対策等が必要であると考えられる。

Z軸移動では、X、Y軸移動に比べ荷重変化量が大きかった。これは、「制御なし」におけるZ軸移動の荷重変化の速度がX、Y軸移動に比べ大きく、モータの回転速度が荷重変化の速度に追従できなかったことが原因と考える。よって、応答性の高いDCモータに変更することで解決できる可能性がある。

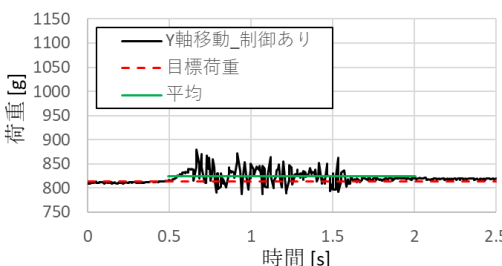
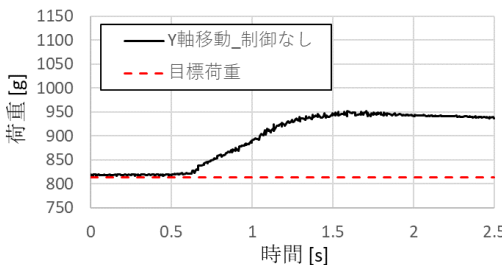


(c) Z軸移動時

図4 各軸における荷重の時間変化



(a) X軸移動時



(b) Y軸移動時

表1 各軸における荷重変化の最大値及び荷重変化量

		荷重変化の最大値[g]	荷重変化量[%]
X軸移動	制御なし	140.7	100
	制御あり	61.0	43.4
Y軸移動	制御なし	138.3	100
	制御あり	65.6	47.4
Z軸移動	制御なし	299.2	100
	制御あり	226.5	75.7

#### 4. まとめ

- ・風力発電設備におけるブレード先端リーディングエッジを補修対象に設定し、ドローンに吊り下げられたロボットで、補修作業を行うシステムを考案した。
- ・補修システムを模擬した評価装置を構築し、ロボットの吊り下げ時における荷重負荷制御の評価実験を行った。PID制御を用いた荷重負荷制御アルゴリズムによりモータを制御し、荷重負荷を一定に保持できる可能性が示唆された。

#### 5. 今後の課題

本研究ではテグス巻き取りや巻き戻しを行うモータにステッピングモータを使用した。今後はより応答性の高いDCモータを使用し荷重負荷制御の検証を行う予定である。

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ものである。