

ウィンチ式リフトに搭載する電動ウィンチのモータ制御開発

吉田 英晴* 中山 恵介** 富田 洋文**

1. はじめに

風力発電のブレードは、軽微な損傷の場合においても時間経過とともに損傷が深くなるため、早期の補修が望まれる。しかし、高所での作業のため容易ではなく、コストも高くなる。ドローンと作業ロボットの連携によるブレード補修を実現するため、当センターでは、ドローンとロボットを接続する機構（ウィンチ式リフト）の開発を進めている。

図1にウィンチ式リフトによるドローンとロボットの接続手法を示す。6台の電動ウィンチによるワイヤーを使用し、ロボットを昇降させる。さらに各ワイヤーをねじるように組み込むことで、風などの外力による揺動に強い構造にした¹⁾。

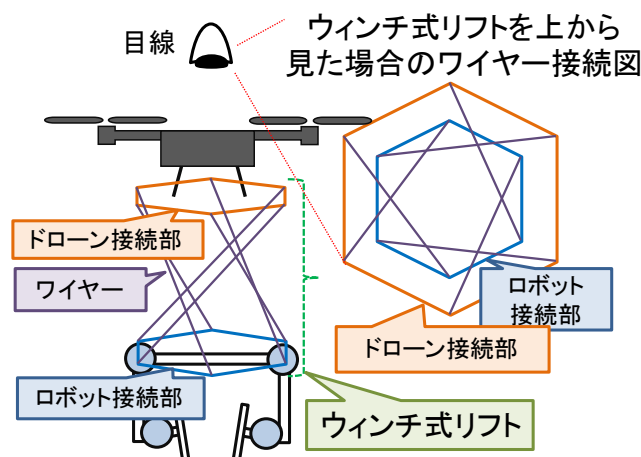


図1 6本ワイヤーを使用したドローンと作業ロボットの接続手法

2. ウィンチ式リフトと搭載する電動ウィンチのシステム

図2にウィンチ式リフトと搭載する電動ウィンチのシステム構成図を示す。ワイヤーによる作業ロボット吊り下げ姿勢制御を搭載した小型コンピュータのI2C通信により、6台の電動ウィンチを操作する。操作指示を受けた電動ウィンチは、その目標ワイヤー出力速度や張力になるように、モータドライバに指示を与える。なお、ワイヤー出力速度や、張力制御への制御モード変更や、電動ウィンチの特異なワイヤー制御に対応するため、本研究では、汎用的なBLDCモータ制御モジュールは搭載せず、MCUへFOC/ベクトルモータ制御を実装した。

図3に、一般的なFOC/ベクトル制御と台形制御によるモータ電圧波形を示す。FOC/ベクトル制御はモータ電気角に応じて、モータへ入力させる電圧計算を行うため、台形制御より効率的なモータ制御が可能になる。しかし、BLDCモータに搭載する3つのホールセンサによる電気角測定の分解能は60度なので、あらゆる電気角に応じた計算は必要ない。そのため、ホールセンサ

によって電気角を判定させるシステムでは、実装が容易な台形制御が使用される場合がある。

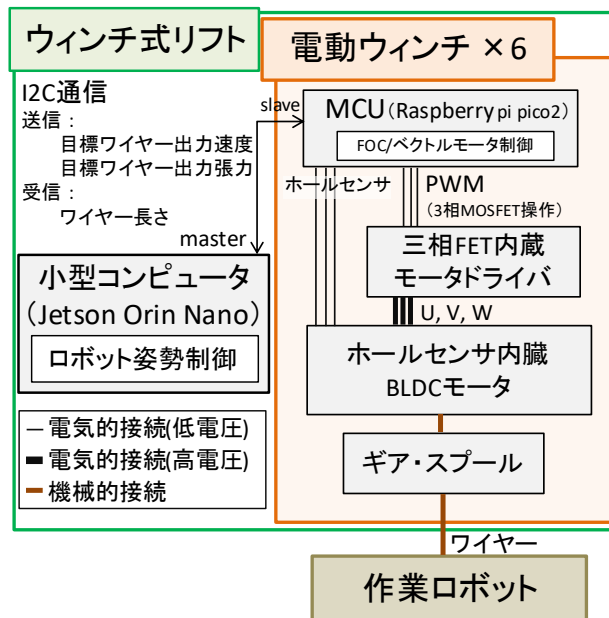


図2 ウィンチ式リフトと搭載する電動ウィンチのシステム構成図

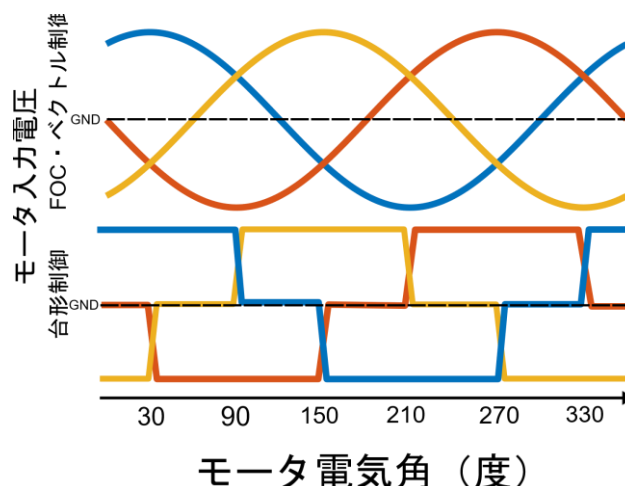


図3 FOC/ベクトル制御と台形制御のモータ電圧波形

しかし、図4に示すように、ホールセンサは、正回転時と逆回転時で反応する電気角が異なるヒステリシスがある。典型的な台形制御では、このヒステリシスの要素を制御の演算に組み込むことはできない。そのため、本研究では、より柔軟な対応が可能なFOC/ベクトル制御を実装した。なお、使用しているホールセンサのヒステリシスは45度程度あるものとして扱っている。なお、当角度は暫定的な設定値であり、正確性はない。

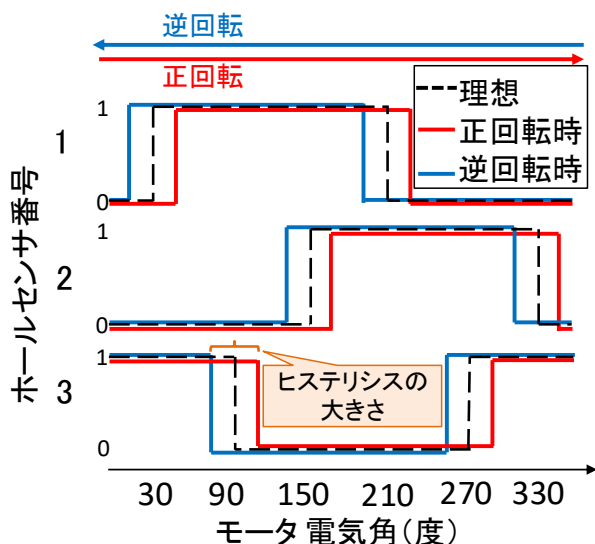


図4 モータ電気角とホールセンサ出力の関係

3. ウィンチ式リフトのワイヤー張力制御

図5に、ブレード補修作業時のドローンとロボットの状態を示す。ドローンは、補修対象である風車ブレードの上空へ移動したのち、ウィンチ式リフトによりロボットをブレードへ降下させる。そして、ロボットのアームでブレードを挟み込むことでロボットを固定し、ブレードの補修作業を行う。しかし、アームの挟み込む力ではロボットの自重を支えることは難しいため、ウィンチ式リフトのワイヤー張力を活用し、ロボットのブレード固定を行う。

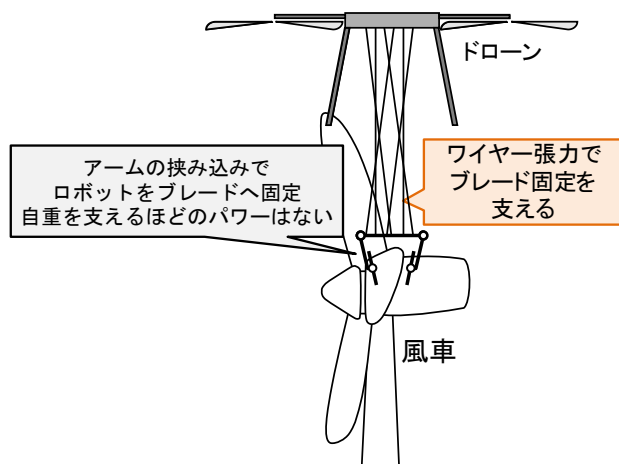


図5 ブレード補修作業時のドローンとロボットの状態

3.1 電動ウィンチ動力部

図6に電動ウィンチ動力部のモデル図を示す。モータの動力はギア、スプールを経てワイヤーへ伝達される。ロボットはアームによりブレードに固定されているため、反力は常にワイヤー張力に等しくなる。モータの動力 (P_{motor}) は、ギアなどの機械的な損失 ($P_{loss(giar)}$) を経てワイヤーへ伝達されるため、ワイヤー張力は、 P_{motor} と $P_{loss(giar)}$ の要素から算出できる。本研究ではこのうち、 P_{motor} の導出手法を検証した。

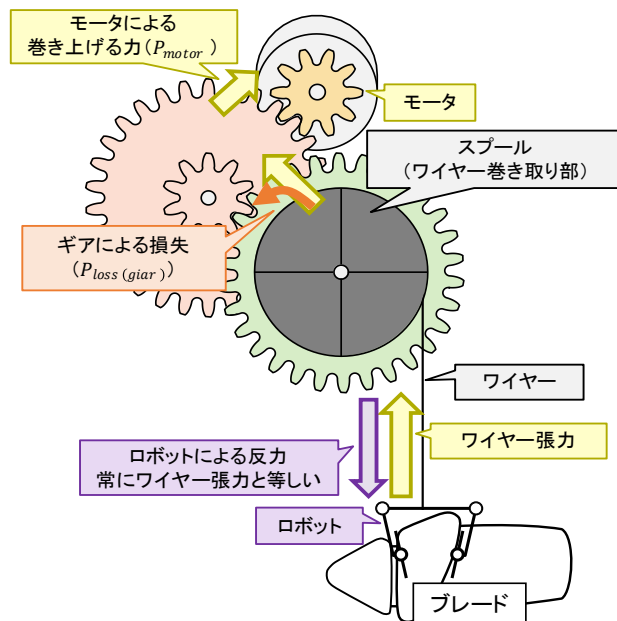


図6 電動ウィンチ動力部のモデル図

3.2 モータの損失式

モータの出力を導出するために、まず下記にモータの損失の要素²⁾についてまとめた。

モータの損失

1. 機械損
 - ・ 摩擦損 : $\propto f$
 - ・ 風損 : $\propto f^2$
2. 銅損 : $\propto I^2$
3. 鉄損
 - ・ ヒステリシス損 : $\propto f$
 - ・ 渦電流損 : $\propto f^2$

これらの損失をひとつにまとめるとモータの損失 (P_{loss}) は下記の式に近似する。

$$P_{loss} \approx \alpha f^2 + \beta f + \gamma I^2$$

※ f : モータ電圧の周波数, I : 電流

上記式で示す損失係数 $\alpha \sim \gamma$ は、次の章に示す実験により導出した。

3.3 モータ損失係数の導出

図7に、モータの損失係数を導出するための試験条件を示す。モータへ入力する電圧、電流はパワーメータを使用し、モータの出力トルク及び回転数はトルク測定器を使用して測定した。

また、図8に示す通り、モータの出力はトルク 0.1 ~ 30mNm、回転数 500 ~ 4500rpm において測定した。

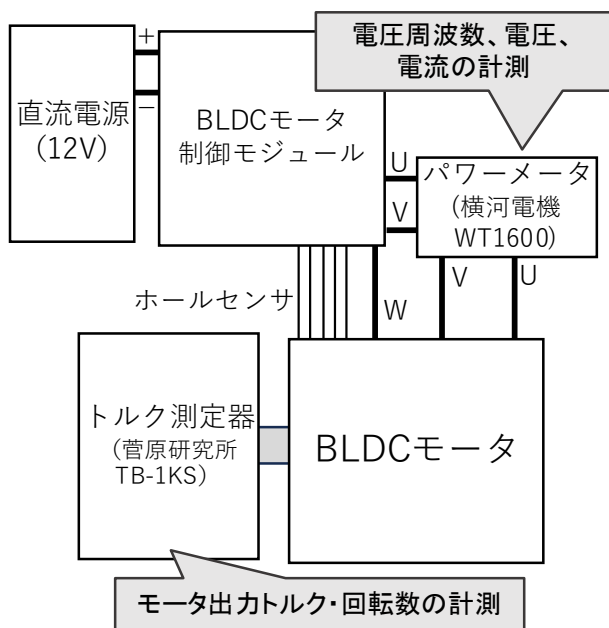


図7 モータ損失係数導出の試験環境

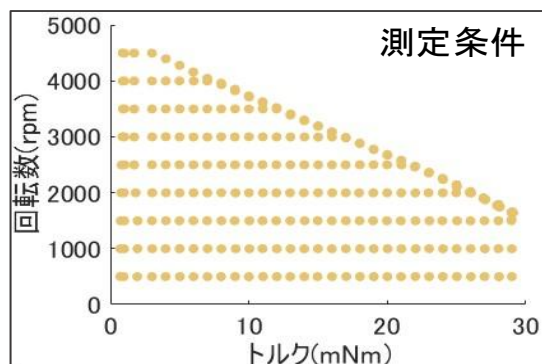


図8 計測したモータの出力トルクと回転数

図9に、導出した損失係数とその係数を使用した損失の推定結果を示す。損失係数 β 由来である摩擦損やヒステリシス損は検出されず、風損、渦電流損、銅損による損失が占めていた。また、実損失と推定損失の差は平均 $0.064 \pm 0.068\text{W}$ であり、ワイヤー張力制御の実装に活用できるレベルであると考えられる。

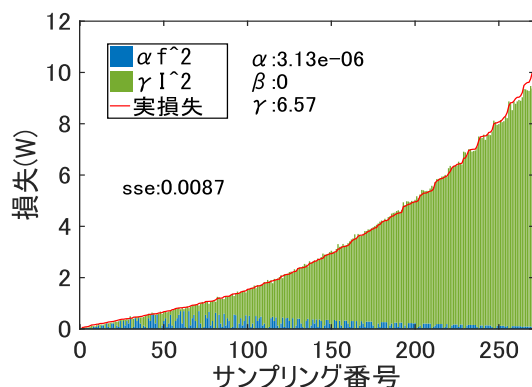


図9 モータ損失の測定値と推定値の比較

3.4 モータ電流の計測コストについて

モータ損失係数導出の試験ではパワーメータを使用して、モータ電流を計測したが、モータ電流の計測を

行うには高性能な AD コンバータが要求されると考える。

図10に示す電動ウィンチにおけるモータ制御部のシステム構成図とモータ電流の波形を例に、AD コンバータに要求される性能について説明する。電動ウィンチの BLDC モータは MOSFET 内臓ドライバを使用して制御を行い、MOSFET は pico2 の PWM 信号により制御する。モータに流れる電流はドライバ内の電流検出機により、0~3.3V にスケーリングされて出力される。当システムでは、このスケーリングされた電圧値し、電流に換算する。

モータの電流は、出力した PWM の電圧に追従して値が変化するため、PWM 周波数が 100kHz の場合、読み取るべき電流値のスパンは数 μ 秒であり、pico2 内臓の ADC*の性能では実用的な電圧計測ができない懸念がある。電圧を正確に読み取るために、PWM 周波数を低くする、もしくはより高性能な ADC モジュールを使用するなどの対策があるが、本研究では、電流値を計測せずに、モータ回転数と電圧値から電流値の推定は可能か検討した。

※ pico2 内臓 ADC サンプルング速度は 500kS/sec

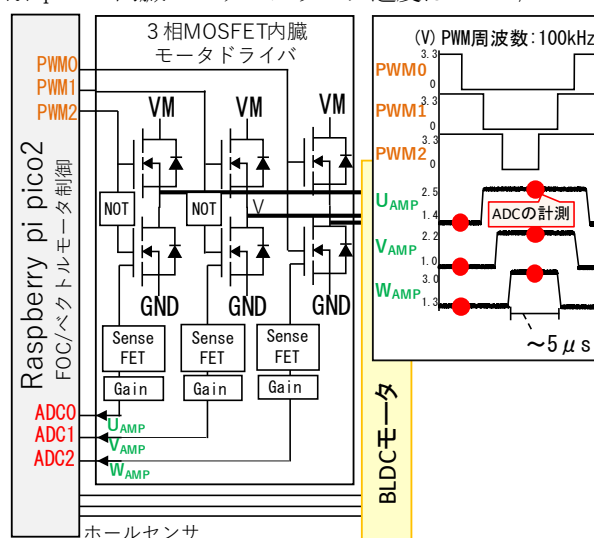


図10 電動ウィンチにおけるモータ制御部のシステム構成図とモータ電流波形

図11に計測したモータ電圧、回転数、電流値のグラフを示す。同等に近い回転数毎にデータを確認すると、およそ電圧と電流が比例している。さらに回転数を上げるごとに比例式の切片がそれに比例して下がる傾向がみられた。そこで、電流は下記に示す3次元平面式に近似すると考えた。

$$\text{電流(A)} \approx \alpha \text{電圧(V)} + \beta \text{回転数(rpm)} + \gamma$$

図12に計測したモータ電圧、回転数、電流値と3次元平面の電流推定式を当てはめたグラフを示す。面真横から描画したグラフでも確認できる通り、測定値と推定式は近似しており、平均 $0.035 \pm 0.022\text{A}$ の差であった。モータ電圧と回転数から電流値の推定は実用的なレベルであると考えられる。

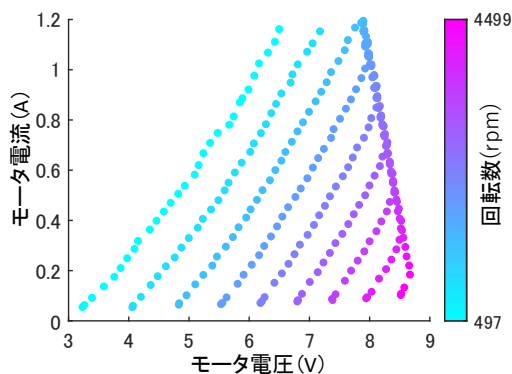


図11 モータ電圧値、回転数、電流の相関

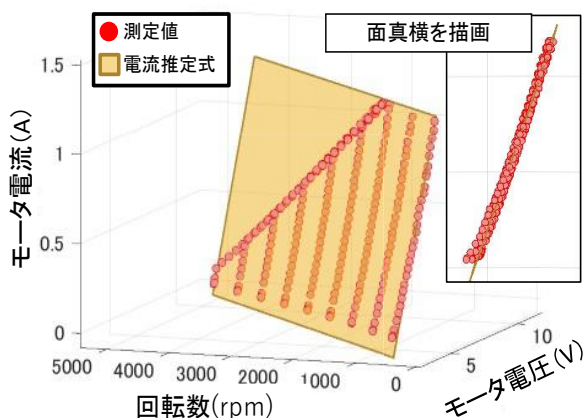


図12 計測したモータ電圧、回転数、電流値と推定電流値の比較

4. まとめ

当センターでは、ドローンと作業ロボットの連携によるブレード補修を実現するため、ドローンとロボットを接続するためのウィンチ式リフトの開発を進めている。

補修作業時における作業ロボットのブレードへの固定の際、ウィンチ式リフトのワイヤー張力を活用した固定を行う。このワイヤー張力制御の実現のため、電動ウィンチに搭載するモータとギアの損失の導出が必要と考え、モータの力の損失式を導出した。損失の計測値と推定値の差は平均0.064Wであり、ウィンチ式リフトのワイヤー張力制御へ活用できるレベルであったと考える。

さらに、モータ回転数と電圧値から電流値の推定は可能か合わせて検討した。その結果、電流値の測定値と推定値の差は平均0.035Aであり、実用的なレベルであると考えられる。

5. 今後の予定

本研究では、ワイヤー張力制御に必要なモータによる力の損失の推定式を導出した。次は、ギアによる力の損失式を導出し、ウィンチ式リフトのワイヤー張力制御を実装する予定である。

また、ドローン、ウィンチ式リフト、ブレード補修ロボットを組み合わせた実証試験を行う予定である。

この試験の実施に向けて、ウィンチ式リフトの開発と製作を行っており、開発中であるウィンチ式リフトと電動ウィンチの外観を図13、図14に示す。

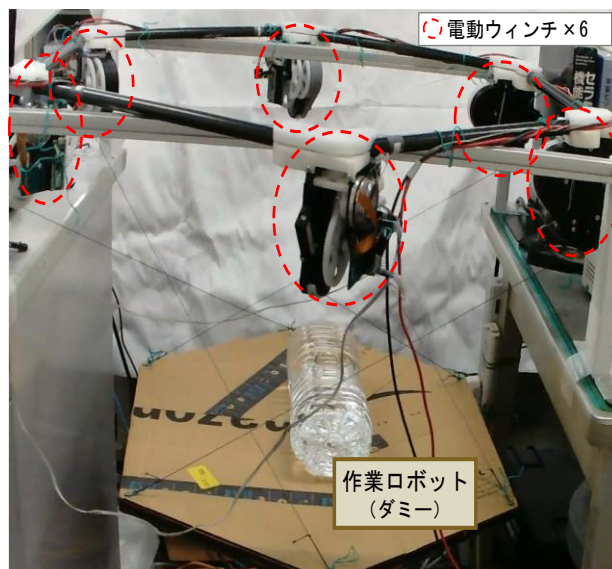


図13 ウィンチ式リフトによるロボット昇降の様子

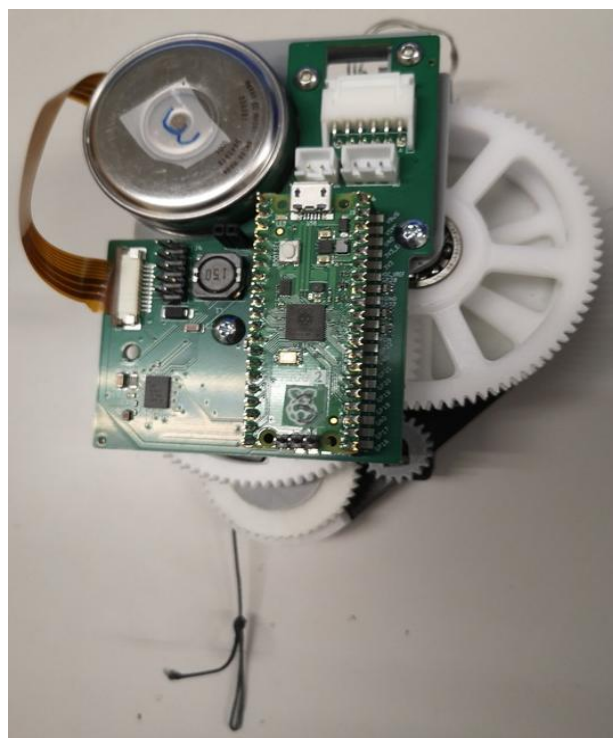


図14 電動ウィンチの外観

6. 参考文献等

- 1) 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)
- 2) Portescap 株式会社：鉄損が BLDC モータの選定に直接及ぼす影響，2022.