

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

吉田 英晴* 中山 恵介** 富田 洋文**

1. はじめに

効率化や省力化のため、製造・農業・医療などあらゆる分野で作業ロボットの活用が進められているが、高所作業などの場所では、ロボットの設置や移動が難しいのが現状である。

弊所では、ドローンによる作業ロボットの運搬、設置、回収の実現による作業ロボットの活用範囲拡大を目的とした研究を行っており、その手法のひとつとして、ワイヤーを使用したウィンチ式リフトを検討している。

本研究では、ウィンチ式リフトを用いた手法の課題である「風などによるロボットの揺動を低減させるワイヤー接続手法」を考案し、「その手法を用いた場合の耐揺動性」を評価した。さらに、「ロボット部の揺動の観測に使用するカメラを用いた位置姿勢推定アルゴリズム」を考案し、推定精度を評価した。

2. ドローンと作業ロボットの連携

図1に、ウィンチ式リフトを使用したドローンと作業ロボット活用のフローとして、風力発電設備のブレード補修の例を説明する。

- (1) ロボット運搬時の操作
 - ① ドローン下部にロボットを固定し、ドローンと共に離陸、飛行、着陸が行う。
- (2) ロボット設置時の操作
 - ① ドローンは上空でホバリングさせる。
 - ② ロボットを緩やかに降下させ、ブレード上に設置する。
- (3) ロボット回収時の操作
 - ① ロボットを引き上げ、ドローン下部に固定し、ロボット運搬状態に移行する。

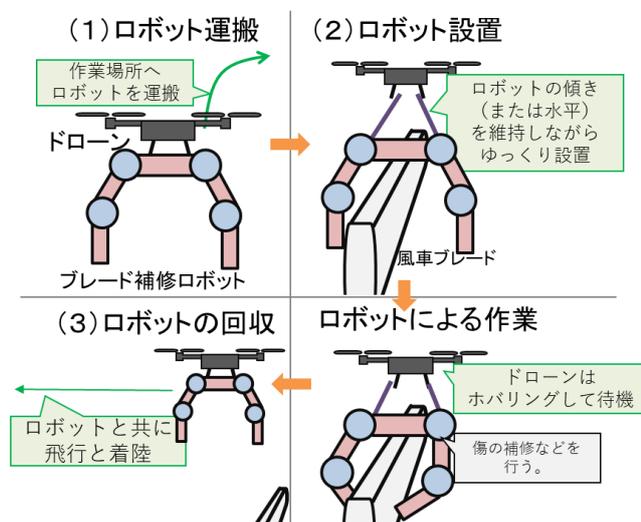


図1 風車ブレード補修ロボットにおける作業フロー

上記フローの実現の課題として、(2)②に示す作業ロボットのブレード上への設置の際、風などの影響によるロボットの揺動により、設置が困難になることが考えられる。そこで、耐揺動性の高いワイヤー接続を実現すべく、図2に示すドローンとロボット間を6本のワイヤーにねじれを交えた接続を行った。

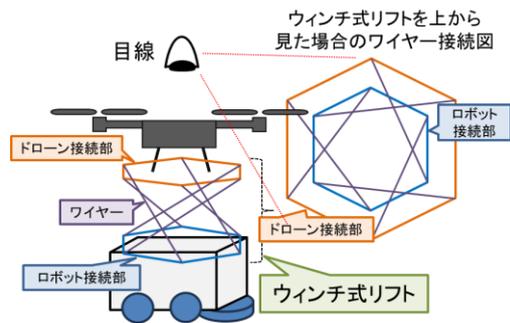


図2 6本ワイヤーを使用したドローンとロボットの接続手法

3. ウィンチ式リフトのワイヤー接続手法

3.1 ねじれ力に対する耐揺動性

ロボットにねじれ力が加わった場合の耐揺動性について説明する。図3に示すように、ロボットがねじれた場合、ロボット位置は単純に上方向に移動する軌跡となる。

図4に示す単純なワイヤー接続においても同様の軌跡であるが、図5に示すように、ねじり角度に対するロボット位置(高さ方向)のグラフを確認すると、6本接続では、ねじり0°付近で傾きが大きいため、ロボットの自重により、ねじられにくい構造であることが分かる。

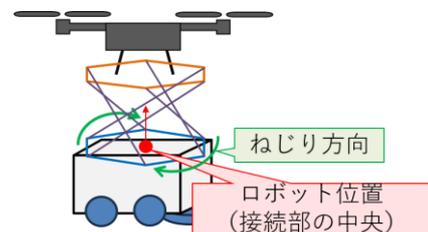


図3 ロボット部へねじりが生じた場合の位置の軌跡

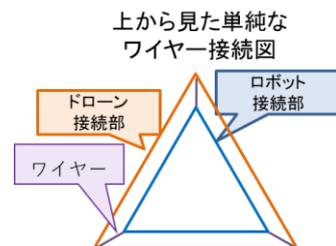


図4 3つのワイヤーを用いた単純な接続手法

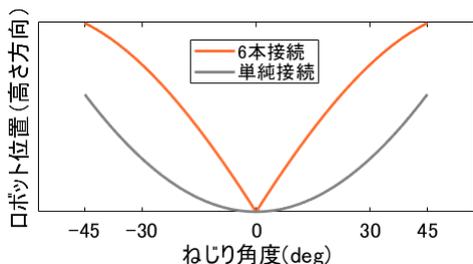


図5 6本接続と単純接続におけるねじれ角度に対するロボット位置の変遷

図6に、ロボットがねじられた場合のワイヤーの状態を示す。ロボットがねじられた場合、6本のワイヤーのうち3本に張力がかかりロボットを支えるが、残りの3本はワイヤーがたるんだ状態になる。このような状態は、ねじり角度 0° を境にそれぞれのワイヤーの張力の状態が変化するため、 0° を境としてロボット位置が切り替わる。

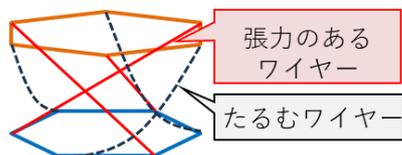


図6 ロボットがねじれた場合のワイヤーの状態

3.2 水平方向への力に対する耐揺れ性

ロボットの水平方向に力が加わった場合の耐揺動性について説明する。水平方向に力が加わった場合、6本接続と単純接続ともに、ロボット位置は図7に示すように、おわんの形状をした軌跡をたどる。図8は6本接続と単純接続の軌跡を比較したものである。6本接続の方が、水平移動に対するロボット位置の高さ方向への変化が大きいため、ロボット自重により揺動しにくくなるが分かる。

3.3 風の影響による耐揺れ性の試算

ワイヤー6本接続の耐揺れ性を評価するため、図9に示す条件下での風速に対する耐揺動性を試算した。ドローンおよびロボットのワイヤー接続部は、ともに正六角形で外接円の半径が0.3mの位置にした。また、ロボット重量は15kgであり、重心はロボット接続部中央にあるものとし、風の受圧面積は 0.1 m^2 とした。この条件下におけるロボット昇降高さ0.5～5mに対して、試算した。

ロボット昇降高さ0.5mの場合の状態図を用いて、耐揺動性の計算方法について説明する。図10にロボット位置の軌跡を、図11にその断面図のグラフを示す。図12は、図11に示しているロボット位置0m時の傾斜角を、風向 $0\sim 360^\circ$ において計算した結果である。なお、本試算では風向は水平方向にのみ吹くものとした。図12の結果から、高さ0.5m時の傾斜角は、 $15\sim 28^\circ$ の範囲であることが分かった。

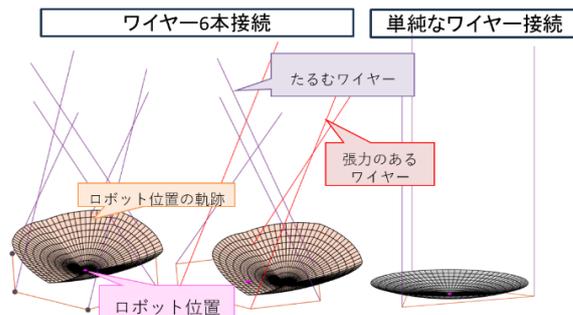


図7 6本接続と単純接続のロボット位置の変遷

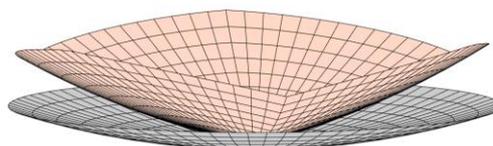


図8 6本接続と単純接続のロボット位置の変遷の比較

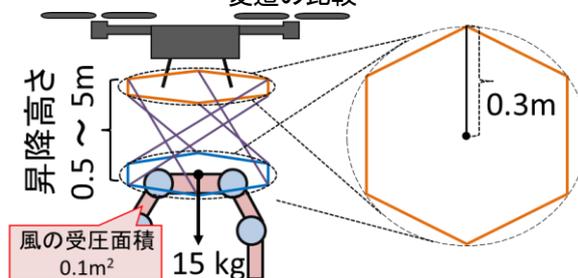


図9 風速に対する耐揺れ性の試算条件

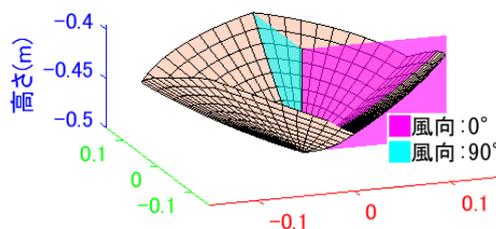


図10 昇降高さ0.5 m時のロボット位置の軌跡

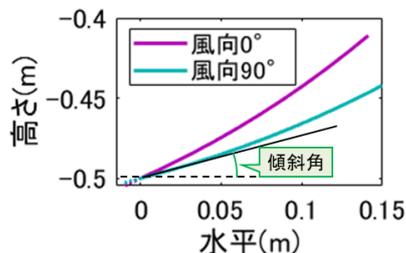


図11 ロボット位置の軌跡の断面

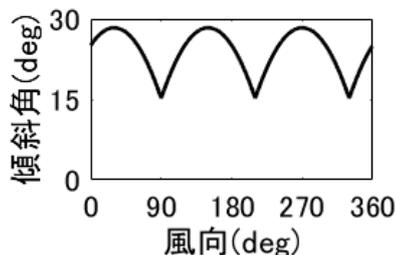


図12 風向に対する傾斜角の変化

算出された傾斜角から、次の方法で耐風圧を計算した。まず、ロボットが風圧により動こうとするときの力のモデル図を、図13に示す。ロボットは重量により常に戻ろうとする力 ($W\sin\theta$) が発生している。ロボットが風圧を受けた場合の進もうとする力は $P\cos\theta$ であり、これが $W\sin\theta$ を上回ったときにロボットが揺動し始める。この $W\sin\theta$ と $P\cos\theta$ が等しい場合の P 値を、耐風圧とした。

さらに、下記の風圧から風速への変換式を用いて耐風速を計算し、ロボット昇降高さに対する耐風速を試算した。その結果を図14に示す。昇降高さ1mの場合では、耐風速6.0~8.2 m/sであった。これは、この風速以下であればロボットは揺動しないことを示す。また、昇降高さが低いほど耐風速が高く、昇降高さが高くなるにつれ緩やかに低下する傾向が見られた。

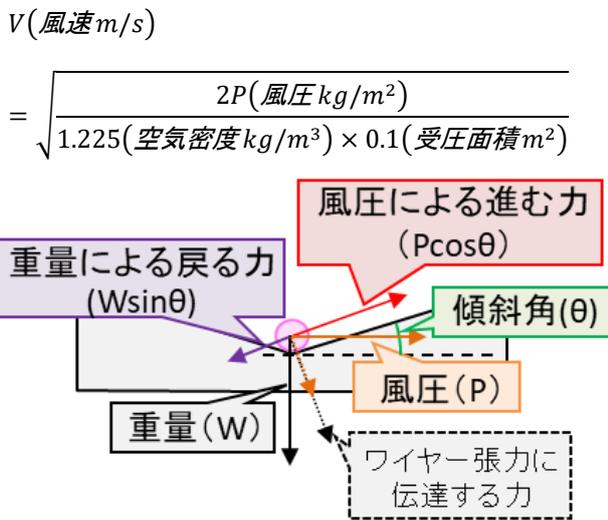


図13 風圧を受けたロボットの力のモデル図

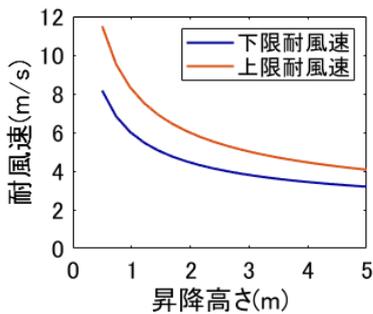


図14 昇降高さに対するロボットの耐風速

3.4 考察

運用を予定している昇降高さは2mである。その場合の耐風速は、4.4 m/s (軟風¹⁾ (木の葉や細い小枝が絶えず動く。軽い旗が開く。)) であり、その風速以下であれば、風の影響によるロボット部の揺動はないことが試算された。しかし、ロボット作業の実際の運用を行う上では、それ以上の風速の発生や、ワイヤーへの風の影響、ドローンホバリングの揺れ、ドローン飛行が巻き起こす風 (ダウンウォッシュ) など、ロボットを揺動させる要因がある。そのため、さらなる耐揺動性の向上のため、本接続手法に加え、ダウンウォッシュの影響を低減させる防風機構や、ロボットの

揺動を低減させるウィンチによるワイヤー長さ調整制御の開発を予定している。

4. カメラによるロボット接続部の位置姿勢の推定

ロボット接続部の揺動を観測し、ワイヤーの長さを調整することで、揺動を抑制させる制御の実装を検討している。揺動の観測には、慣性計測ユニット(IMU) や距離センサーを使用した方法が考えられるが、本研究では、カメラを使用した観測方法を検討した。

4.1 提案手法と比較手法の位置姿勢推定

カメラによる位置姿勢推定は、OpenCV とアルコーマーカーを使用した位置姿勢推定²⁾ (以下、比較手法と呼ぶ) が知られている。こちらの手法は「アルコーマーカーの各辺の実長さ」と「撮影画像上のアルコーマーカーの位置を使用した計算」により、位置姿勢を推定する。しかし、本研究のウィンチ式リフトでの開発の事例においては、「3つのマーカーの頂点を結んで作成した三角形の各辺の実長さ」と「撮影画像のアルコーマーカーの頂点位置を使用した計算」の方が、より精度の高いロボット部の位置姿勢推定ができるであろうと考え、本アルゴリズムの開発を行い、推定精度を比較検証した。この提案手法と比較手法のそれぞれの手法について図15に示した。

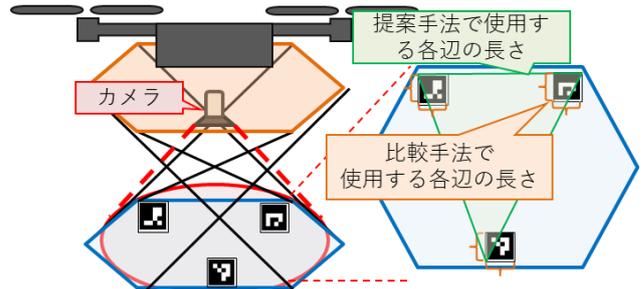


図15 ロボット部の位置姿勢推定アルゴリズムで使用される提案手法と比較手法の対象の辺の長さ

4.2 提案する位置姿勢推定の手法

提案手法の位置姿勢推定手法について、図16を使用して説明する。

キャリブレーションを行ったカメラの撮影画像上のマーカー頂点位置を判定すると、マーカーの実位置の単位ベクトル $\vec{P}_1 \sim \vec{P}_3$ が得られる。さらに、3つのマーカー間の実長さ $L_1 \sim L_3$ を使用し、カメラから3角形の頂点までの長さ $r_1 \sim r_3$ を求められる。ただし、この計算で得られる各 r の長さは8つの解 (虚数解やマイナスの解を含む) を含むため、事前に、おおよその位置姿勢情報を取得する必要がある。この問題は、比較手法についても同様であり、Z-Axis flipping 現象などとして知られている。

4.3 提案手法と比較手法の位置姿勢推定精度の検証

図17の例に示すように、3つのアルコーマーカーを持つボードをカメラから [奥行き 2.5 m]、[横方向に 0 m と 0.25 m]、[ピッチ角 10°]、[ヨー角 0° 11.25° 22.5° 45°] の計8パターンに配置した撮影画像に対

して、提案手法と比較手法を使用した位置姿勢推定を行い、推定精度を比較した。なお、ボードの配置はメジャーや分度器による計測のため、実位置との誤差が大きいと考えられるため、参考値程度に留めて頂きたい。

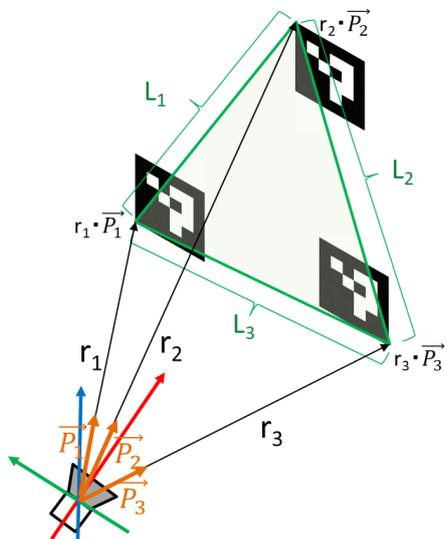


図16 提案する位置姿勢推定手法のモデル図

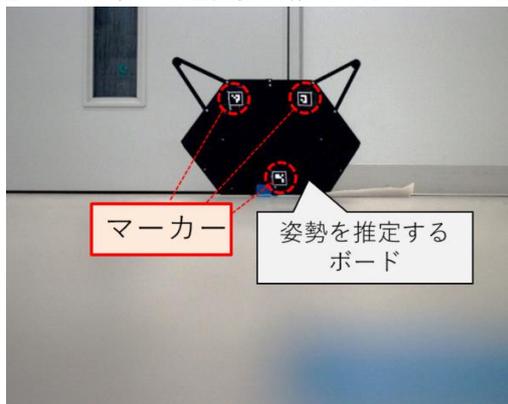


図17 精度検証に使用した画像の例

図18の位置姿勢推定結果の例に示すように、各手法の重心位置とボードの面法線を推定し、実際の重心位置と面法線の距離とコサイン類似度を比較したところ、提案手法は 0.018 ± 0.0093 m、 0.999 ± 0.001 であり、比較手法は、 0.098 ± 0.048 m、 0.891 ± 0.0603 であった。

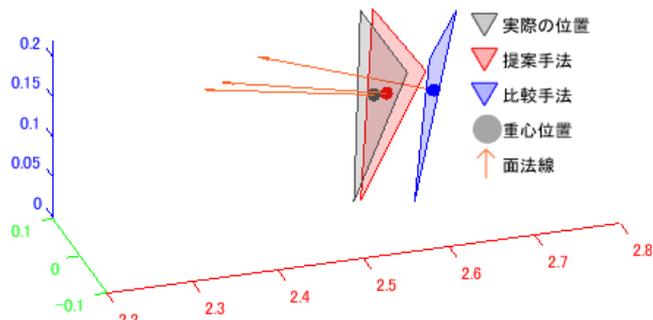


図18 各手法の位置姿勢推定結果の例

4.4 考察

提案手法のロボット部の位置姿勢推定手法は、実位置と平均0.018 mの誤差は生じるが、比較手法と比較

して、位置姿勢推定の精度は向上した。提案手法は、事前におおよその位置姿勢情報を取得する必要があること、また、画像を使用した解析のため、計算コストが高いことから、ロボット部にIMUの搭載や、ワイヤー長さからの計算による位置姿勢の推定の組み合わせが必要だと考えている。

5. まとめ

弊所では、ドローンによる作業ロボットの運搬、設置、回収の実現による作業ロボットの活用範囲拡大を目的としたウィンチ式リフトの開発を行っている。ウィンチ式リフトの課題である風などによる作業ロボットが揺動しにくいワイヤー接続手法の考案を行った。

その接続手法の耐風速を試算したところ、昇降高さ2 m時、4.4 m/s (軟風) 以下の風速では揺動しないことが分かった。さらに、ウィンチによるワイヤー長さ調整制御による揺動の低減を実現するため、カメラによるロボット部の位置姿勢推定アルゴリズムの考案を行い、その推定精度を検証したところ、比較手法より0.08 m位置推定精度が向上した。

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。

6. 今後の予定

ドローンを使用したウィンチ式リフトの実証実験を行うプロトタイプを製作している(図19)。今後は、プロトタイプを使用した実証実験の結果を基に、ペイロード30 kgを目標としたウィンチ式リフトの設計、製作とその実証実験を予定している。

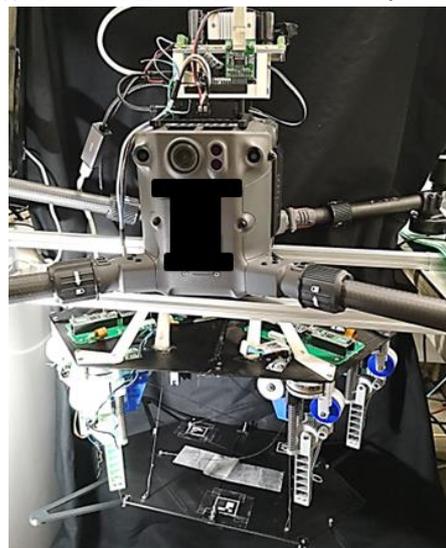


図19 ウィンチ式リフトのプロトタイプ製作

7. 参考文献等

- 1) 気象庁「ビューフォート風力階級表」
- 2) https://docs.opencv.org/4.x/d9/d6a/group__aruco.html#gaba7f1e107f93451e2bc43b8ea96eef8c